

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA MEXICALI**

Maestría y Doctorado en Ciencias e Ingeniería



Implementación del uso de Vehículos Aéreos No Tripulados para la elaboración de Modelos Digitales de Elevaciones de alta resolución para el análisis hidrológico en microcuencas intraurbanas, caso de estudio: El Vidrio, Mexicali, Baja California

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

**Presenta:
Walter Avila Ruiz**

**Director de Tesis: Dr. Carlos Salazar Briones
Co Dirección: Dr. José Mizaél Ruiz Gibert**

Mexicali, Baja California, junio del 2022

Agradecimientos:

A Dios, por acompañarme en todo momento y estar conmigo cuando más lo necesitaba.

- *A Alejandra Noemí*

Por ser mi compañera de vida, por su amor incondicional, por estar conmigo en todo momento.

- *A mi hijo*

Angel Gael, siendo mi motor e inspiración para seguir adelante.

- *A mi familia*

A mis padres, Gregorio Avila que a pesar de ya no encontrarse físicamente con nosotros, ha estado para mí en todo momento y María Ruiz que me ha apoyado en todo momento, por su amor incondicional.

Mis hermanos Juan Pablo, Nancy, Roberto y Jorge Luis, mis suegros Angel Pérez y Noemí León, y mi comadre Yolanda León, a todos ellos agradezco que estén conmigo.

- *Mis compañeros y amigos de trabajo*

Juan Arturo, Karina, Oscar, Valeria, Benjamín, Melissa, Manuel y todos los que me han acompañado en este viaje, por su amistad y apoyo, también agradecer a mis amigos Josué, Armando y Margarita que han sido parte de este camino, y un especial agradecimiento al Ing. José Carlos Romero, siendo un mentor y amigo en todo momento, apoyándome a seguir adelante.

- *Y especialmente a:*

MI director de tesis: Dr. Carlos Salazar Briones por ser mi maestro en este camino, por las enseñanzas y consejos de vida que me ha brindado, por su amistad

Mi Co-director de tesis: Dr. Mizaél Ruiz por ser mi otro mentor, asesorándome y compartiéndome sus conocimientos, siendo un guía y un gran amigo.

Dr. Marcelo Lomelí: Por ser un amigo que siempre ha estado para mí impulsándome a superarme.

Contenido

Figuras	5
Tablas	6
Glosario de términos	7
Capítulo I Introducción	10
Planteamiento del problema	13
Justificación	14
Objetivo General.....	15
Objetivos específicos	16
Enfoque general de la tesis	16
Aportaciones a la investigación.....	17
Capítulo II Marco Teórico	18
Sistema Geodésico Nacional	18
Marco de Referencia ITRF en México.....	18
Modelo digital de elevaciones (MDE)	21
MDE para la representación del relieve	24
Fotogrametría	25
Antecedentes de la Fotogrametría	26
Fotogrametría terrestre	27
Fotogrametría aérea	27
Resolución de imagen digital	28
Fotogrametría mediante el uso de VANT	29
Structure from Motion (SfM)	30
Uso de VANT en Ingeniería Civil	31
Implementación de herramientas SIG para ingeniería civil.....	32
Cuencas Hidrográficas.....	33
Tipos de cuencas	34
Morfometría de una cuenca	36
Parámetros asociados a la forma de la cuenca	37
Zona de estudio	42
Medio físico	43
Eventos de Inundación en El Vidrio.....	43

Capítulo III Materiales y Métodos	46
Planificación de vuelo fotogramétrico	46
Distribución de PCTs	47
Procesamiento de datos y generación de MDE	50
Resultados y discusión	57
Modelo Digital de Elevaciones por medio de VANT	58
Comparación de MDE VANT-INEGI	58
Generación de escurrimientos y cuencas.....	60
Parámetros morfométricos de las microcuencas.....	62
Factor de forma de Horton	68
Relación de elongación	70
Conclusiones y recomendaciones	72
Conclusiones teóricas	72
Conclusiones metodológicas.....	72
Conclusiones físicas.....	73
Referencias bibliográficas	75

Figuras

Figura 1. Población media mundial en riesgo por inundaciones, fuente: WRI/elaboración propia.	10
Figura 2. Inundación de la ciudad de Allahabad, India, agosto de 2016.	11
Figura 3. Elementos principales de un sistema de referencia.	19
Figura 4. Ejemplo de MDE, complejo lagunar y Río Nuevo, Mexicali B.C, resolución de 5m.	21
Figura 5. Representación de matriz de celdas (Ráster) de una superficie.	22
Figura 6. Tipos de resoluciones de imágenes.	29
Figura 7. Comparación de SfM con los métodos LiDAR terrestres y aéreos.	31
Figura 8. Principio básico del SfM.	31
Figura 9. Representación general de una cuenca.	34
Figura 10. Representación de los tipos de cuencas.	35
Figura 11. Representación de cuenca, subcuenca y microcuenca.	36
Figura 12. Esquema de modelos de formas de cuenca según rangos del coeficiente de Gravelius.	39
Figura 13. Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas.	40
Figura 14. Orden de cauces por el método de Strahler.	41
Figura 15. Localización de la zona de estudio.	42
Figura 16. Nota periodística sobre problemas de inundaciones, diario “El Imparcial.”	44
Figura 17. Nota periodística diario “La voz de la frontera” sobre riesgos de daños por lluvias.	45
Figura 18. Reunión de autoridades con ciudadanos por problemática de inundaciones.	45
Figura 19. VANT marca DJI modelo Mavic Pro.	46
Figura 20. Distribución de PCTs en la zona de estudio.	48
Figura 21. Equipo GPS marca Trimble, modelo R7.	49
Figura 22. Verificación de calidad de imagen, vista a marca de PCT.	50
Figura 23. Diagrama de procedimiento fotogramétrico para generación de MDE-MDT, programa Metashape.	51
Figura 24. Diagrama de la generación de escurrimiento y microcuencas en el programa ArcGIS.	54
Figura 25. Diagrama de la generación de escurrimiento y microcuencas en el programa Global Mapper.	55
Figura 26. Diagrama de la generación de escurrimiento y microcuencas en el programa SAGA GIS.	56
Figura 27. Modelo digital de elevaciones generado por VANT, vista de planta.	58
Figura 28. Modelo digital de elevaciones INEGI, resolución 5m.	59
Figura 29. Modelo Digital de Elevaciones VANT, resolución 0.13m.	59
Figura 30. Escurrimientos y microcuencas MDE VANT ArcGIS.	60
Figura 31. Escurrimientos y microcuenca MDE VANT GlobalMapper.	60
Figura 32. Escurrimientos y microcuenca MDE VANT SAGA GIS.	61
Figura 33. Escurrimientos y microcuencas MDE INEGI ArcGIS.	61
Figura 34. Escurrimientos y microcuencas MDE INEGI GlobalMapper.	61
Figura 35. Escurrimientos y microcuenca MDE INEGI SAGA GIS.	61
Figura 36. Resultados de tiempo de concentración con el MDE VANT.	65
Figura 37. Resultados de tiempo de concentración con el MDE INEGI.	65
Figura 38. Resultados del coeficiente de compacidad con el MDE VANT.	67
Figura 39. Resultados del coeficiente de compacidad con el MDE INEGI.	67
Figura 40. Resultados del factor de forma de Horton con el MDE VANT.	69
Figura 41. Resultados del factor de forma de Horton con el MDE INEGI.	69
Figura 42. Resultados de la relación de elongación con el MDE VANT.	71
Figura 43. Resultados de la relación de elongación con el MDE INEGI.	71

Tablas

Tabla 1. Características de los marcos de referencia en México a través del tiempo.	19
Tabla 2. Relación de diferencias entre los marcos de referencia WGS84 e ITRF.	20
Tabla 3. Fuentes de datos de consulta de MDE.	22
Tabla 4. Ventajas y desventajas del uso de VANT.	32
Tabla 5. Clasificación de cuencas con respecto a su superficie, fuente: Campos Aranda (1992).	36
Tabla 6. Características de la cuenca de acuerdo con el valor kc.	38
Tabla 7. Rangos aproximados del factor de forma de Horton, fuente: Pérez, 1979.	40
Tabla 8. Especificaciones de parámetros utilizados para vuelo fotogramétrico.	47
Tabla 9. Coordenadas del vértice CAT40, marco de referencia ITRF08, época 2010.0.	49
Tabla 10. Lista de coordenadas de PCTs.	49
Tabla 11. Parámetros asociados a la forma de la cuenca y su comportamiento hidrológico.	57
Tabla 12. Resultado de generación microcuencas en los diversos programas y MDE.	60
Tabla 13. Parámetros primarios de las microcuencas generadas con los programas SIG y MDE VANT.	62
Tabla 14. Parámetros primarios de las microcuencas generadas con los programas SIG y MDE INEGI.	63
Tabla 15. Cálculo de tiempo de concentración.	64
Tabla 16. Cálculo de coeficientes de compacidad.	66
Tabla 17. Cálculo de factor de forma de Horton.	68
Tabla 18. Cálculo de relación de elongación.	70

Glosario de términos

- Hidrología. Ciencia que trata de los procesos que rigen el agotamiento y la recuperación de los recursos de agua en las áreas continentales de la **Tierra** y en las diversas fases del **ciclo hidrológico** (OMM).
- Topografía. Ciencia geométrica dedicada a la representación gráfica de la superficie terrestre. Es la disciplina que estudia los principios y procedimientos que nos permiten ilustrar las formas, detalles y elementos de la Tierra, tanto los naturales como los creados por el ser humano.
- Geodesia. Ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico. Dentro de esta definición, se incluye también la orientación y posición de la tierra en el espacio (IGN).
- Sistema Geodésico Nacional. conjunto de conceptos, tecnologías, instrumentos científicos, recursos informáticos, materiales y humanos, normas y servicios de información en la materia empleados para definir en una época específica la forma y dimensiones del globo terrestre o de parte de este, su campo gravimétrico externo, y determinar la ubicación espacial de puntos para los fines de georreferenciación; esto es, de todo objeto que se ubique o pueda ser ubicado en el espacio geográfico. El Sistema Geodésico Nacional lo conforma el conjunto de Especificaciones Técnicas de la presente Norma y su materialización se denomina Marco de Referencia Geodésico (INEGI).
- Sistema de referencia terrestre. Se define como las prescripciones y convenciones, junto con un modelo matemático de la Tierra, que se utilizan para definir en cualquier momento un sistema de ejes coordenados para la ubicación de puntos en nuestro planeta. Una de las características de estos sistemas de referencia es que ubican su centro lo más cerca posible al centro de gravedad de la Tierra (INEGI).
- Marco de referencia terrestre. Es la realización del sistema de referencia y que contempla dos partes: la física, que es la materialización sólida del sistema por medio de un conjunto de puntos, y la matemática, que es la determinación de parámetros, por ejemplo, las coordenadas de las estaciones. El acceso a estos puntos se da por medio de ocupaciones o mediciones (Jekeli, 2006).

- Fotogrametría. Es el arte, ciencia y tecnología para la obtención de medidas fiables de objetos físicos y su entorno, a través de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos (ASPRS).
- *Structure from Motion*. Técnica de bajo costo que tiene sus orígenes en la comunidad de la visión por computador, método fácil de utilizar, para la obtención de datos de alta resolución en un rango de escalas, capaz de representar un objeto 2D a 3D con sólo unas cuantas fotografías desde diferentes puntos de vista (Tomás-Jover et al., 2016).
- Sistemas de Información Geográfica. Es un sistema que crea, administra, analiza y mapea todo tipo de datos a un mapa, integrando datos de ubicación (dónde están las cosas), así con todo tipo de información descriptiva (cómo son las cosas allí) (ESRI).
- Modelo Digital de Elevaciones. Representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo (INEGI).
- Vehículo Aéreo No Tripulado. Vehículos controlados vía remota, comúnmente conocido como drones.
- Cuenca hidrográfica. Zona de la superficie terrestre en donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por el sistema de corrientes hacia un mismo punto de salida (IMTA), las cuales se conforman de subcuencas y microcuencas.
 - I. Subcuencas. Ríos secundarios que desaguan en el río principal, cada afluente tiene su respectiva cuenca.
 - II. Microcuencas. Son los afluentes a los ríos secundarios, como quebradas y riachuelos que desembocan y alimentan a los ríos secundarios.
- Inundación. Desastre natural causado por la acumulación de lluvias y agua en un lugar concreto (Cabrera, 2010).
- Esguerrimiento superficial. esguerrimiento que viaja sobre el suelo y después por los cauces de los ríos (IGG).
- Morfometría. Es el estudio cuantitativo de las particularidades físicas de una cuenca hidrográfica, se utiliza para analizar la red de drenaje, las pendientes y la forma de una cuenca a partir del cálculo de valores numéricos.

- Parámetro. Variables y constantes que aparecen en una expresión matemática, siendo su variación la que da lugar a las distintas soluciones de un problema.
- Infraestructura. realización humana diseñada y dirigida por profesionales de Ingeniería, Urbanismo, etc., que sirven de soporte para el desarrollo de otras actividades y su funcionamiento, necesario en la organización estructural de las ciudades y empresas (Universidad de Oxford).
- LiDAR. Light Detection and Ranging.
- GPS. Sistema de Posicionamiento global (por sus siglas en inglés).
- GNSS. Sistema Satelital de Navegación Global (por sus siglas en inglés).
- ITRF08. En México el ITRF08 es el marco de referencia horizontal que conjunta estaciones GNSS permanentes que conforman la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA), en las que se captan los datos de las constelaciones GNSS las 24 horas de los 365 días del año, y a partir de las cuales se densifica el marco geodésico cuyas siglas en inglés significa Marco de Referencia Terrestre Internacional del año 2008.
- WGS84. Siglas en inglés de *World Geodetic System 84* (que significa Sistema Geodésico Mundial 1984). Sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de la Tierra.
- Monumento. Estructura de pequeñas dimensiones comúnmente de concreto que sirve como punto de referencia durante un levantamiento topográfico, la cual dicha estructura cuenta con coordenadas establecidas o por establecer.
- GSD. Ground Sample Distance.
- RGNA. Red Geodésica Nacional Activa.
- RGNP. Red Geodésica Nacional Pasiva.
- MDE. Modelo Digital e Elevaciones.
- SIG. Sistemas de Información Geográfica.

Capítulo I Introducción

En el mundo, las inundaciones están aumentando más rápidamente que ningún otro desastre, posiblemente porque el acelerado desarrollo de las comunidades modifica los ecosistemas locales, incrementando los riesgos de inundación (Salas, 1999). Otro factor que acrecienta el riesgo de las inundaciones tiene que ver con la localización, ya que cada vez hay más gente hacinada a lo largo de las orillas de los ríos y en ocasiones por las sequías se obliga a las ciudades a concentrar una mayor densidad de población de lo adecuado.

En los últimos años, las inundaciones en zonas urbanas son uno de los principales problemas a nivel global (Miller y Hess, 2017; Roodsari y Chandler, 2017; Sunde et al., 2016; Yao et al. 2016) debido a sus efectos negativos hacia el desarrollo económico, salud pública y calidad de vida, afectando mayormente a países en vías de desarrollo.

De acuerdo con el Instituto de Recursos Mundiales (WRI por sus siglas en inglés) hay más de 20 millones de personas con riesgo a sufrir los efectos de los aumentos del nivel del agua de los ríos y de acuerdo con una lista de 160 países, algunos de los más afectados se encuentran en el continente asiático, tal como se muestra en la figura 1.

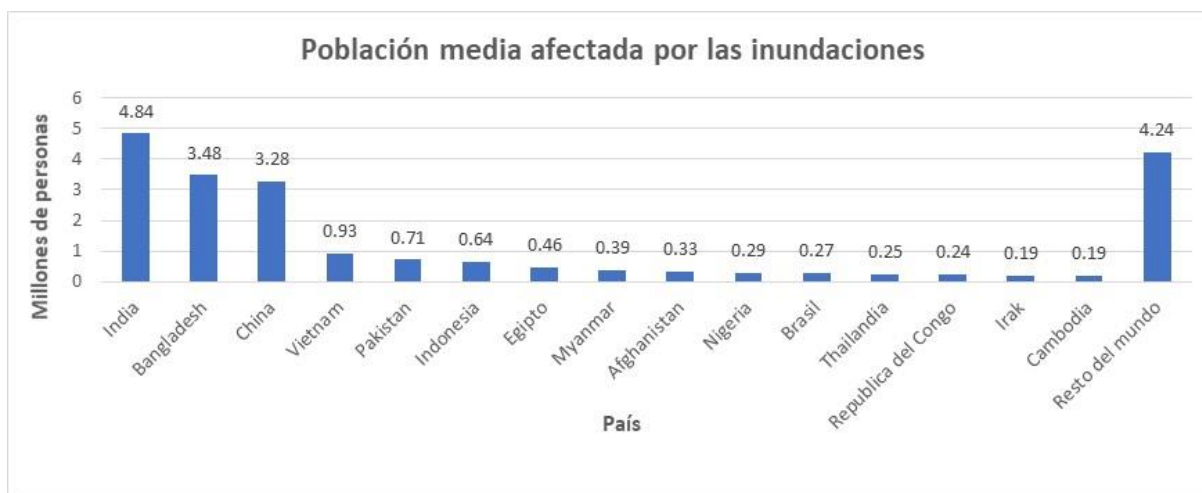


Figura 1. Población media mundial en riesgo por inundaciones, fuente: WRI/elaboración propia.

En el caso del incremento de ciudades y una no adecuada planificación de crecimiento infraestructural conlleva al incremento de superficies impermeables, ejemplo de ello, incremento en vialidades pavimentadas, carreteras, techos de edificios, estacionamientos, entre

otros (Kuang et al., 2013; Liu et al., 2014) y disminuye los suelos naturales, como bosques, cuerpos de agua y cultivos.

El alto incremento del crecimiento urbano y de superficies impermeables aumentan la intensidad, velocidad y duración de las escorrentías superficiales al momento de un evento de precipitación, disminuyendo la infiltración del agua y recarga a los acuíferos, aumentando los volúmenes máximos de inundaciones (Brun y Band, 2000; Moscrip y Montgomery, 1997), como ejemplo, en la figura 2 se muestra la ciudad de Allhabad en la India de como se ha visto afectada por las inundaciones.



Figura 2. Inundación de la ciudad de Allahabad, India, agosto de 2016. Fuente: Rajesh Kumar Singh / AP/NBC

Por consecuencia, la hidrología se enfrenta a la demanda social de dar respuestas que se apliquen en el territorio (OMM, 2019), y por ello, los resultados de los estudios hidrológicos urbanos basados en la recopilación de datos, cálculos y modelos hidrológicos urbanos constituyen un elemento fundamental necesario para una gestión significativa del agua no solo en áreas urbanas sino también en cuencas hidrográficas enteras (Niemczynowicz, J., 1999).

En las últimas décadas el análisis hidrológico de cuencas intraurbanas ha sido de gran importancia dentro de las disciplinas de la hidrología, obteniendo una gran relevancia

(Niemczynowicz 1999; Price y Vojinovic 2011; Schirmer et al.2013; Braud et al. 2013; Fletcher et al.2013).

Uno de los componentes de mayor relevancia para la hidrología urbana y la delimitación de cuencas son las redes de escurrimientos superficiales (Li et al., 2019). Dicho esto, la delimitación de cuencas hidrográficas es un factor indispensable para el análisis del comportamiento hidrodinámico, transporte de sedimentos, gestión de la cuenca y calidad de agua (Billen et al., 2005).

Para la delimitación de cuencas hidrográficas, la topografía el factor primordial, ya que esta delimita las demarcaciones naturales y sus límites (puntos de mayor elevación que forman los parteaguas y sus características hidrográficas). Al interior, las cuencas se pueden delimitar o subdividir en subcuencas o cuencas de orden inferior como lo son las microcuencas (INE, 2004).

En México, de acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología (INE) hoy en día conocido como el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), para la generación de cuencas hidrográficas en el territorio nacional se utilizaron métodos semiautomatizados en conjunto con métodos y técnicas manuales-digitales utilizando programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) con datos cuya escala fuente es la carta topográfica 1:250 000.

Para la obtención de los mapas de cuencas hidrográficas se realizaron una serie de pasos metodológicos que se describen a continuación:

1. Rectificación y complementación de las curvas de nivel a escala 1:250 000, realizando correcciones de curvas con inconsistencia al momento de la digitalización y curvas incompletas, comúnmente inconsistencias presentes en zonas costeras cuyas curvas ingresaban al mar y regresaban al relieve continental, cortando la línea de costa.
2. En base a la digitalización de curvas de nivel, se generaron los Modelo Digital de Elevaciones (MDE) en formato de celdas (Raster) con una resolución de 100m.
3. Mediante comandos de los programas SIG, se obtuvieron digitalmente los parteaguas y las redes de drenaje.
4. Exportación de archivos a ArcView 3.2 (ESRI 1998).

5. Finalmente, de manera visual y manual, se detallaron los límites de las cuencas y sus escurrimientos superficiales, comparándola con la cobertura digital original del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

En esta serie de pasos, se menciona el termino MDE, el cual se define como estructuras numéricas de datos que representan la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, la topografía ([Felicísimo, 1994](#)). Son estructuras muy ventajosas de donde puede extraerse gran parte de los parámetros necesarios para los análisis hidrológicos y estos pueden encontrarse en bases de datos gratuitas de diversas instituciones y centros de investigación ([Pusireni, obtenido en 2021](#)).

Para la delimitación hidrográfica utilizando un MDE, es necesario utilizar programas SIG y sus herramientas de geoprocésamiento, mostrando como resultado cuencas que conforman las zonas de estudio o de interés, adicionando y describiendo la morfometría de la o las cuencas, calculando los parámetros que nos indican sus características físicas y su comportamiento al momento de eventos de precipitación e inundaciones.

Planteamiento del problema

A pesar de que la utilización de lo MDE ha tenido un gran crecimiento, en ocasiones se presentan problemas al momento de realizar alguno de los geoprocésamientos hidrológicos, ya que los MDE de código abierto disponibles y de acceso libre son de una resolución promedio de entre 15 a 30m y por consecuencia, se cuenta con una limitación en la precisión espacial y a su vez, se pueden generar redes de drenaje poco precisas y definidas, problemática en análisis a escalas locales.

La extensión espacial de estos modelos no siempre cuenta con coberturas de los países, especialmente los países en desarrollo. Para un país en desarrollo como México, una de las fuentes más viables de datos espaciales es la fuente de datos local nacional que INEGI. Los datos de topografía del INEGI varían en escala y formato. La resolución máxima MDE de INEGI disponibles de forma gratuita es de 5m, aun así, estas resoluciones aún pueden presentar deficiencias para la delimitación de cuencas pequeñas y escurrimientos, así como la identificación de cambios de pendientes, carreteras, identificación de infraestructura como edificios, etc. Para la realización de un mejor análisis, la resolución de MDE debe comprender en el rango de 0.1 a 0.4m ([Mark et al., 2004](#)).

En consecuencia, de no utilizar un MDE de alta resolución, algunas de las características físicas de las cuencas como sus áreas y pendientes de cauces principales pueden presentar diferencias significativas a la realidad (Buakhao & Kangrang, 2016), en especial en el análisis de microcuencas intraurbanas cuyas dimensiones son considerablemente más pequeñas en comparación de cuencas hidrográficas (la denominación de cuenca, subcuenca y microcuenca se determinan con respecto al tamaño de su superficie, comúnmente medidas en km^2) y es de interés el conocimiento de la morfometría, ya que junto con las lluvias son los factores primordiales a la contribución de eventos de inundaciones (Bannari et al., 2017).

Justificación

Algunas investigaciones relacionadas con el uso de MDE mencionan la importancia de la resolución de estos modelos, por ejemplo, Mauricio & Sánchez 2019 publicaron un artículo llamado *"Impacto de la resolución del MDE en la modelación de procesos hidrológicos"*, cuyo objetivo fue analizar el impacto de la resolución de diversos MDE en la modelación de procesos hidrológicos utilizando diversos MDE de resoluciones de 90m, 15m, 25cm y 4cm, observando que las áreas con mayores escurrimientos y sedimentos son variantes de acuerdo a la resolución del MDE con el que se realizaron las modelaciones hidrológicas, no obstante, observaron que los MDE de 25cm y 4cm mostraban las mismas áreas con mayor escurrimiento y la generación de sedimentos, concluyendo que estas dos resoluciones arrojan los mismos resultados en la descripción de un sistema hidrológico, que para fines de modelaciones hidrológicas, concluyeron que el utilizar un MDE de mayor resolución de 25cm no muestra una diferencia considerable en los resultados.

Asimismo, Pereira & Collischonn en su publicación *"Propuesta metodológica para la utilización de modelos digitales de elevaciones de alta resolución en modelación hidrológica/hidrodinámica de gran escala"* realizaron un estudio de la cuenca del Río Itajaí, en Brasil con una superficie aproximada de $15,000 \text{ km}^2$, mostrando cómo se es posible el aprovechar la información de un MDE de alta resolución (1m) en una modelación hidrológica-hidrodinámica de una cuenca, obteniendo mejores resultados en comparación al uso de un MDE convencional de baja resolución (90m), concluyendo que el MDE de resolución de 1m representó de mejor manera el comportamiento de las planicies de inundación en el modelo de propagación inercial de caudales. Sin embargo, los autores también concluyen que en

análisis de la cuenca de estudio no es necesario el aprovechamiento de la información del modelo de alta resolución en su totalidad, sugiriendo realizar un MDE mixto, utilizando el MDE de alta resolución solamente en zonas de los cauces más importantes donde se presenten planicies de inundación en sus márgenes.

Es por ello que en los últimos años, para la generación de MDE de altas resoluciones, una de las técnicas implementadas ha sido la fotogrametría, el surgimiento de programas especializados y la implementación de Vehículos Aéreos No Tripulado (VANT), que en conjunto, han sido una alternativa viable para la realización de estos tipos de estudios, siendo una tecnología cada vez más accesible y práctica.

Los VANT pueden ser utilizados en la actualización, estudio, monitoreo, inspección u otra actividad en áreas puntuales y concretas, además es posible obtener resoluciones superior a imágenes satelitales (Quispe, 2016). La captura de imágenes realizadas con VANT no solo son útiles en el desarrollo de los MDE, también cuenta con múltiples aplicaciones en áreas del conocimiento como: cartografía, ortofotografía, agronomía, topografía, arquitectura, entre otras (Vergara & Duarte, 2018).

En el tema hidrológico, es necesario explorar las diversas alternativas de MDE de entrada para la delimitación de escurrimientos y cuencas, así como las herramientas para su delimitación, los cuales utilizan los valores de elevación de la resolución de pixeles para determinar la dirección de flujo de los escurrimientos superficiales de una cuenca (Li et al., 2019) y para ello, la fotogrametría y el uso de VANT son una opción viable para la obtención de resultados precisos.

Objetivo General

- Implementar un esquema metodológico para la correcta delimitación de microcuencas intraurbanas mediante la comparación de diferentes herramientas SIG.

Objetivos específicos

1. Realizar un MDE de alta resolución mediante la implementación de VANT y procesos fotogramétricos.
2. Generar una red de escurrimientos superficiales utilizando tres herramientas SIG en la zona de estudio mediante el MDE del proceso fotogramétrico.
3. Generar una red de escurrimientos superficiales utilizando tres herramientas SIG en la zona de estudio mediante el MDE tipo LiDAR con resolución de 5m del INEGI.
4. Calcular parámetros morfométricos de las microcuencas generadas y establecer conclusiones de los resultados obtenidos.
5. Realizar un compa de los resultado obtenidos con lo diversos programas SIG y determinar el resultado que se adecua mejor a las características de la zona de estudio.

Enfoque general de la tesis

El conocimiento de la hidrodinámica superficial en cuencas intraurbanas permite ubicar sitios de potencial vulnerabilidad para la población, que, para la realización de modelaciones hidrológicas y modelaciones hidráulicas, es de gran importancia el conocimiento del relieve topográfico de la zona de estudio, por ello, los MDE generados a partir del uso de VANT nos permite obtener características morfométricas de las microcuencas.

En propuesta de implementar estos MDE para dichos estudios, se espera obtener resultados más precisos que contribuyan a las mejores tomas de decisiones para la mitigación de inundaciones, con un producto al alcance de los interesados, siendo una opción viable en termines calidad-precio, en comparación del uso de topografía convencional o percepción remota, cuyos costos de adquisición de datos pueden ser muy elevados y con información menos precisa.

Aportaciones a la investigación

La importancia de calcular los parámetros morfométricos de una cuenca permite describir el su comportamiento hidrológico, el cual, estos parámetros son calculados con respecto a su fisiografía (forma de la superficie terrestre).

Es por ello que la mayor aportación de esta investigación es realizar los cálculos morfométricos de las microcuencas intraurbanas generadas en la zona de El Vidrio, utilizando diferentes MDE de diferentes resoluciones y diversos programas SIG, comparando los resultados que permitan identificar la resolución adecuada de MDE y el programa adecuado para este tipo de análisis, ya que estos resultados pueden ser variados entre ellos, pudiendo alterar el análisis hidrológico.

Adicionalmente, el uso de un MDE de alta resolución en cuencas intraurbanas permiten definir de forma más precisa los elementos existentes que puedan alterar el comportamiento hidrológico, específicamente elementos (en comparación de cuencas rurales que han sufrido mínimas modificaciones) creadas por el ser humano, modificando sus características originales, ejemplo de ello es la creación y desarrollo de infraestructura gris, como la presencia de edificaciones y vías terrestres, en especial calles, avenidas y carreteras, que alteran las pendientes de las cuencas y algunos otros factores como el coeficiente de escorrentía (C), que si bien en cuestiones morfométricas este coeficiente no se ve involucrado, si es un factor fundamental en el análisis hidrológico y modelaciones hidráulicas.

Capítulo II Marco Teórico

Sistema Geodésico Nacional

El Sistema Geodésico Nacional (SGN) es el conjunto de conceptos, tecnologías, instrumentos científicos, recursos informáticos, materiales y humanos, normas y servicios de información en la materia empleados para definir en una época específica la forma y dimensiones del globo terrestre o de parte de este, su campo gravimétrico externo, y determinar la ubicación espacial de puntos para los fines de georreferenciación; esto es, de todo objeto que se ubique o pueda ser ubicado en el espacio geográfico (INEGI, 2016).

La Norma del SGN especifica los sistemas a los que debe alinearse cualquier levantamiento geodésico en México, contribuyendo a dar fundamento y sustento a Marcos de Referencia, el mantenimiento y densificación de la Red Geodésica Nacional y la integración de los datos geodésicos al Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica (SNIEG) (INEGI, 2021).

Marco de Referencia ITRF en México

Los marcos de referencia geodésicos han cambiado a lo largo del tiempo debido al desarrollo de nuevas técnicas que permiten mejorar los sistemas de coordenadas a nivel global definiendo un sistema de ejes coordenados para la ubicación de puntos en nuestro planeta.

Sin embargo, en ocasiones los conceptos de sistema de referencia y marco de referencia son utilizados de la misma manera, la cual, si bien es cierto que tienen una relación directa, también son diferentes términos, los cuales se mencionarán sus definiciones a continuación:

- *Sistema de referencia* es una definición conceptual de teorías, hipótesis y constantes que permiten situar una triplete de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y su orientación. Una de las características de estos sistemas de referencia es que ubican su centro lo más cerca posible al centro de gravedad de la Tierra (figura 3).

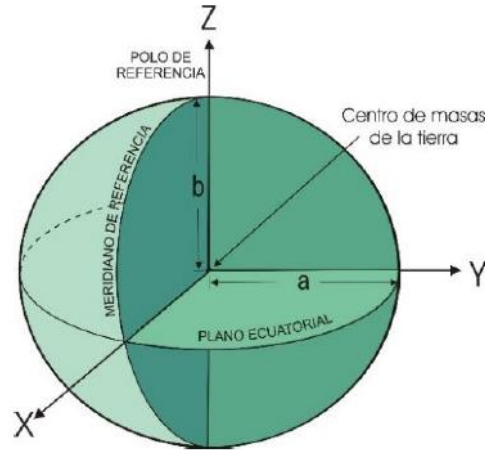


Figura 3. Elementos principales de un sistema de referencia.

- *Marco de referencia* es la materialización de un sistema de referencia convencional a través un conjunto de puntos y sus observaciones mediante técnicas geodésicas (lugares localizados en la superficie terrestre) con coordenadas y velocidades conocidas en el sistema de referencia convencional y cuya finalidad es la materialización en el espacio el sistema de referencia.

En México se han utilizado diferentes marcos de referencia geodésicos a lo largo de las últimas décadas. La normatividad en relación con su uso y aplicación ha estado a cargo del INEGI, los marcos de referencia oficiales en México son:

Tabla 1. Características de los marcos de referencia en México a través del tiempo.

	NAD27	ITRF92	ITRF2008
DATUM	NAD27	ITRF92	ITRF2008
ELIPSOIDE	Clarke 1866	GRS80	GRS80
ÉPOCA	-----	1988.0	2010.0
VIGENCIA	1985-1998	1998-2010	2010-a la fecha

En relación de los sistemas y marcos de referencias con la hidrografía en México, de acuerdo con el *Documento Técnico Descriptivo de la Red Hidrográfica Escala 1:50,000* del INEGI del año 2010, menciona que la información de la red hidrográfica se almacena en una base de datos en el marco de referencia ITRF92 época 1988, utilizando coordenadas geográficas, no obstante, este marco geodésico ha sido sustituido por el marco de referencia ITRF08 época 2010, tal como se mencionó en la tabla 1.

El marco de referencia actual en México es el ITRF08 época 2010.0, indicado en el artículo 10 de la *Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional*, que dice:

Artículo 10.- Toda Estación Geodésica perteneciente a un levantamiento geodésico horizontal, deberá estar referida al Marco de Referencia Terrestre Internacional definido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y de Sistemas de Referencia para el año 2008, con datos de la época 2010.0, denominado ITRF08 época 2010.0, asociado al elipsoide de referencia definido en el GRS80. Este es el Marco de Referencia oficial para los Estados Unidos Mexicanos.

Desde el punto de vista cartográfico, el Sistema Geodésico Horizontal definido en esta Norma es compatible con el WGS84, así como SIRGAS, por lo que sólo en aquellos casos en que un proyecto tenga como requerimiento mejor exactitud posicional se deberá realizar la transformación de coordenadas de WGS84 o SIRGAS al ITRF08 época 2010.0.

Sin embargo, a pesar el sistema de coordenadas oficial es ITRF08, usuarios de equipos GPS/GNSS ejecutan sus proyectos en el sistema WGS84, ya que es el único sistema de referencia de coordenadas geográficas mundial utilizado en la actualidad que permite la localización de cualquier punto en cualquier parte del planeta, es el sistema estándar por defecto para coordenadas en los dispositivos GPS/GNSS comerciales, la cual y por lo tanto, la utilización de este sistema es permitido de acuerdo a las normas técnicas, además, su similitud con el ITRF08 es tan precisa que, en cuestiones de sistemas de referencia, su diferencia es prácticamente nula (tabla 2) y por ello se es permitido utilizar el WGS84 (en cuestión de marco de referencia, existen diversas variables entre el WGS84 y el ITRF08 que no permiten ser semejantes entre estos, como ejemplo la red de estaciones activas distribuidas en el mundo).

Tabla 2. Relación de diferencias entre los marcos de referencia WGS84 e ITRF.

Realización WGS84	Equivalente a:	Diferencia aproximada
WGS84 (G730)	ITRF92 (época 1988.0)	10 cm
WGS84 (G873)	ITRF94 (época 1993.0)	2 cm
WGS84 (G1150)	ITRF2000 (época 1997.0)	1-2 cm
WGS84 (G1674)	ITRF2008 (época 2005.0)	1-2 cm
WGS84 (G1762)	ITRF2008 (época 2005.0)	<1 cm

Modelo digital de elevaciones (MDE)

Un MDE es una representación visual y matemática con valores de elevaciones con respecto al nivel medio del mar que permite representar relieve elementos y objetos que se presenten (figura 4). Estos valores están contenidos en un archivo de tipo Raster con estructura regular, el cual se genera mediante la utilización de ordenadores y programas especializados (INEGI, 2020), estos modelos, a menudo se denominan también Modelo de Terreno Digital (MTD), Modelo de Superficie Digital (MSD) o Modelo de Altura Digital (MHD) (Poon, 2005).



Figura 4. Ejemplo de MDE, complejo lagunar y Río Nuevo, Mexicali B.C, resolución de 5m., Fuente: INEGI

Las superficies se suelen representar con modelo Raster. Un Raster es una matriz de celdas, también denominadas píxeles, organizadas en filas y columnas y que cubren diversas zonas del mundo, incluso en su totalidad. Cada celda de una matriz representa una unidad de área cuadrada y contiene un valor numérico que es una medida o una estimación correspondiente a esa ubicación (figura 5).

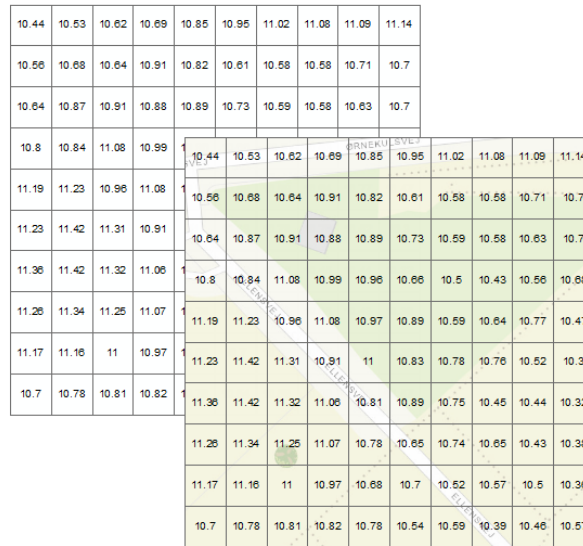


Figura 5. Representación de matriz de celdas (Ráster) de una superficie. Fuente: ESRI.

Existen diversas fuentes de información que proporcionan MDE de diferentes resoluciones en las cuales investigadores recurren a estas fuentes, tal como se menciona en la tabla 3.

Tabla 3. Fuentes de datos de consulta de MDE.

Fuente	Descripción	Resolución	Sitio web de consulta
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)	El resultado de un trabajo cooperativo entre la NASA, el Ministerio japonés de Economía, Comercio e Industria (METI) y Japan Space Systems (J-spacesystems), es un modelo de elevación digital que se utiliza para crear mapas detallados de la temperatura de la superficie terrestre, la reflectancia y la elevación	15m	https://asterweb.jpl.nasa.gov/index.asp
STRM (Stands Shuttle Radar Topography Mission)	Es uno de los MDEs gratuito más conocidos en internet y puedes encontrarlo en casi todas partes, teniendo una cobertura global. La forma más fácil de obtener SRTM es a través de Earth Explorer.	30 m	https://earthexplorer.usgs.gov/
ALOS PALSAR	ALOS es el satélite conocido como DAICHI que te permite obtener MDEs a nivel global y PALSAR es uno de los tres instrumentos del satélite.	30 m	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/a/en/index_e.htm

<p>3DEP</p>	<p>El Programa de Elevación 3D del Mapa Nacional USGS (3DEP) es un proyecto que proporciona los MDE más detallados y precisos para los Estados Unidos.</p>	<p>1 m</p>	<p>https://catalog.data.gov/dataset</p>
<p>Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)-INEGI</p>	<p>Producto que representa las elevaciones del territorio continental mexicano, mediante valores que indican puntos sobre la superficie del terreno, cuya ubicación geográfica se encuentra definida por coordenadas(X,Y) a las que se le integran valores que representan las elevaciones(Z). Los puntos se encuentran espaciados y distribuidos de modo regular</p>	<p>15m</p>	<p>https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/</p>
<p>Relieve continental-INEGI</p>	<p>Representar de manera simplificada las formas que adquiere o tiene la corteza terrestre en su parte superficial para modelar los espacios geográficos y conocer aspectos tales como alturas, pendientes, secciones, desniveles, áreas sujetas a inundación, delimitación de cuencas, entre otros.</p>	<p>5m</p>	<p>https://www.inegi.org.mx/temas/relieve/continental/#Mapa</p>

El conocimiento y representación del relieve siempre ha sido de gran relevancia para estudios y análisis de diversos campos de las ciencias e ingeniería, como lo son:

- Ingeniería Civil
- Ciencias de la Tierra: Hidrología, Geología, Geofísica, Geodesia, entre otras

También en el ámbito cartográfico, uso militar y en SIG.

Los métodos para la generación de los MDE pueden dividirse en dos grupos:

1. Métodos directos

Estos se obtienen a partir de mediciones que se realizan directamente sobre el terreno real, en los cuales podemos citar:

- La toma directa de datos por medio de levantamientos topográficos con estación total o con GPS.
- Uso de altímetros transportados desde una plataforma aérea como el radar o láser.

2. Métodos indirectos

Cuando se utilizan documentos analógicos o digitales elaborados previamente para generar un modelo digital de elevación, en los cuales podemos citar:

- La digitalización de curvas de nivel y puntos de altura de la cartografía topográfica realizada mediante procesos convencionales de conversión automática (mediante escáner y vectorización) o manual (uso de tableta digitalizadora o en pantalla).
- Restitución fotogramétrica numérica, analítica y digital (procesos fotogramétricos).

Para la realización de esta investigación se realizaron métodos indirectos manuales, mediante un proceso fotogramétrico, el cual se describirá en el apartado de materiales y métodos.

MDE para la representación del relieve

La importancia de la representación del relieve ha sido de gran relevancia para el conocimiento de elementos existentes sobre la superficie de la Tierra, teniendo gran relevancia en diversos campos de la ciencia e ingeniería, cuyos resultados son una gran aportación para usuarios y profesionales de estas áreas, como son:

1. Hidrología
2. Geología
3. Cartografía
4. SIG
5. Uso militar
6. Entre otros

Por ello, desde la creación de los MDE en la década de los 50's como representación del terreno ha conseguido lograr el análisis de los elementos existentes en el mismo mediante la utilización de programas y equipos especializados.

Actualmente, mediante el uso de programas SIG, el análisis de los MDE ha mejorado la interacción y análisis de datos para el usuario, permitiendo la visualización instantánea de perfiles longitudinales, visualizaciones 3D, rangos de elevaciones representados por intervalos de colores, sobreposición de datos, etc. Además de realizar análisis más profundos y específicos como la generación de cuencas y escurrimientos superficiales, análisis que se aplican para esta investigación.

Fotogrametría

De acuerdo con la Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS por sus siglas en inglés), define el término de Fotogrametría como: *El arte, ciencia y tecnología de obtención de relieves de objetos físicos y el medio, a través de procesos de registros, medidas e interpretación de imágenes fotográficas, patrones de energía radiante electromagnética y otros fenómenos.*

Además de esta definición, algunos autores o grupos de trabajo adoptan otras definiciones, las cuales son:

La Sociedad Internacional de Fotogrametría y Sensores Remotos (ISPRS por sus siglas en inglés) la define como: *La ciencia de realizar mediciones e interpretaciones confiables por medio de las fotografías, para de esa manera obtener características métricas y geométricas (dimensión, forma y posición), del objeto fotografiado.*

Por su parte, Henri Bonneval, autor de diversas publicaciones y libros sobre fotogrametría la define como *la técnica para estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera, utilizando medidas realizadas sobre una o varias fotografías.*

Etimológicamente, la palabra fotogrametría proviene del griego $\phi\omega\tau\omicron\varsigma$ photos, que significa luz; $\gamma\rho\alpha\mu\mu\alpha$, gramma, que significa lo que está escrito o dibujado, y $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$, metrón, que significa medir. Uniendo estas palabras concluimos que el término de fotogrametría significa *medir gráficamente por medio de la luz.*

La fotogrametría ha sido una herramienta fundamental para la generación de información cartográfica a nivel mundial, la cual la obtención de fotografías aéreas para la obtención de la

cartografía sigue aplicándose en la actualidad. Además, con el avance de la computación, la fotogrametría se convirtió en una ciencia indispensable para el área de la cartografía.

El fundamento de la fotogrametría consiste en la obtención de dos fotografías aéreas verticales sucesivas, partiendo de un punto en común sobre la superficie para después, por medio de una restitución, obtener coordenadas del punto en común.

Antecedentes de la Fotogrametría

De acuerdo con Konecny la fotogrametría se desarrolla y evoluciona en cuatro etapas:

1. Metrofotografía: de partir de 1850 hasta 1900. Se inventa la fotografía por parte Niepce y Daguerre en 1839 en Francia. El término Metrofotografía fue establecido Laussedat, coronel francés en hacia 1851; a quien se lo considera el fundador de la Fotogrametría.
2. Fotogrametría analógica: desde 1900 a 1960, ciclo que se inicia con dos inventos importantísimos, por un lado, la estereoscopia dando origen a la estereofotogrametría y Facultad de Ingeniería Centro de Geociencias Aplicadas UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE Cátedra: FOTOINTERPRETACIÓN APUNTE DE TEORÍA Página 2 PRINCIPIOS DE FOTOGAMETRÍA por otro lado el invento de plataformas adecuadas para los sensores (cámaras) como los zeppelines y el aeroplano.
3. Fotogrametría analítica: desde 1969 hasta 1980, ciclo iniciado por la aparición de las computadoras.
4. Fotogrametría digital: desde 1980 hasta nuestros días, ciclo iniciado a partir del lanzamiento del primer satélite artificial, el Sputnik de origen ruso y por el uso del satélite Landsat de origen estadounidense.

A lo largo del tiempo, la fotogrametría y la tecnología han evolucionado a la par, desde sus inicios como fotogrametría analógica, posteriormente a la fotogrametría analítica y finalmente la fotogrametría digital la cual es empleada en la actualidad (Blachut & Burkhardt, 1989).

La fotogrametría se divide en dos tipos:

1. Fotogrametría terrestre
2. Fotogrametría aérea

Fotogrametría terrestre

La aplicación de la fotogrametría terrestre inició en la arqueología y arquitectura, por otra parte, b n

Fotogrametría aérea

Utiliza las fotografías adquiridas desde una cámara instalada en un vehículo aéreo, colocando el eje óptico de la cámara de modo perpendicular a la superficie terrestre, obteniendo fotografías ortogonales.

A su vez, las fotografías aéreas se pueden dividir en tres tipos, como son:

- Fotogrametría analógica.
 - Fotogrametría analítica.
 - Fotogrametría digital.
-
- Fotogrametría analógica

Este método fotogramétrico se implementó para la realización de la mayoría de la cartografía mundial, esto a partir de la década de 1930, utilizando equipos de restitución y colocando dos fotografías en el equipo donde el operador realiza la orientación para crear un modelo estereoscópico escalado, obteniendo información planimétrica y altimétrica ([Jáuregui, 2010](#)).

- Fotografía analítica

Con el surgimiento de la computación y en combinación al uso de equipos de restitución analógica, en 1957 surge un nuevo método fotogramétrico denominado, fotogrametría analítica, la cual utiliza los equipos restituidores analógicos en complemento de equipos computacionales en surgimiento.

Con ello, se realizaron los cálculos de coordenadas X, Y añadiendo el uso de estereocomparadores integrados en el restituidor.

- Fotogrametría digital

El uso de programas y ordenadores hizo posible la llegada de la fotogrametría digital cuyo producto es la creación de MDE de la superficie terrestre.

El procedimiento de procesamiento es la introducción de imágenes digitales en programas especializados de fotogrametría, el cual, el programa realiza la identificación de puntos homólogos entre fotografías, comúnmente utilizando el método *Structure from Motion* (SfM), obteniendo como resultado una nube de puntos y finalmente obteniendo imágenes Raster, archivos vectoriales o matriciales, tales como lo son los MDE.

Resolución de imagen digital

Aún en la actualidad, el término "*resolución*" es relacionado únicamente a la calidad de una imagen digital, sin embargo, existen diversos tipos de resolución digital cuya diferencia dependerá del tipo de sensor con el que se obtuvieron las imágenes.

Dicho esto, existen cuatro tipos de tipos de resolución, las cuales son:

- Resolución temporal: Refiriéndose a la frecuencia en la cual un sensor regresa a un lugar específico, ejemplo los sensores instalados en satélites.
- Resolución espacial: Resolución definida por el tamaño de píxel de la imagen, abarcando una superficie terrestre o un *Ground Sample Distance* (GSD).
- Resolución espectral: Definida por el número de bandas espectrales con las que cuentan algunos sensores, también comúnmente utilizada en satélites, ejemplo de ellos como lo son los satélites Landsat o Sentinel.
- Resolución radiométrica: Describe la capacidad de un sensor de distinguir objetos visualizados en la misma parte del espectro electromagnético; esto es sinónimo de la cantidad de valores de datos posibles en cada banda (ESRI). Ejemplo, Cada imagen, digitalmente, se guarda en bytes y cada byte está compuesto por 8 bits. Un valor, computacionalmente hablando, se puede guardar como un «0» o un «1», decir que algo tiene 8 bits de información hace referencia a la posibilidad de combinar esos ceros y unos en 8 sub espacios diferentes, es decir, 2^8 que es igual a 256 posibilidades (Alfa Geomatic).

Estos tipos de resoluciones los podemos apreciar de mejor manera en la figura 6.

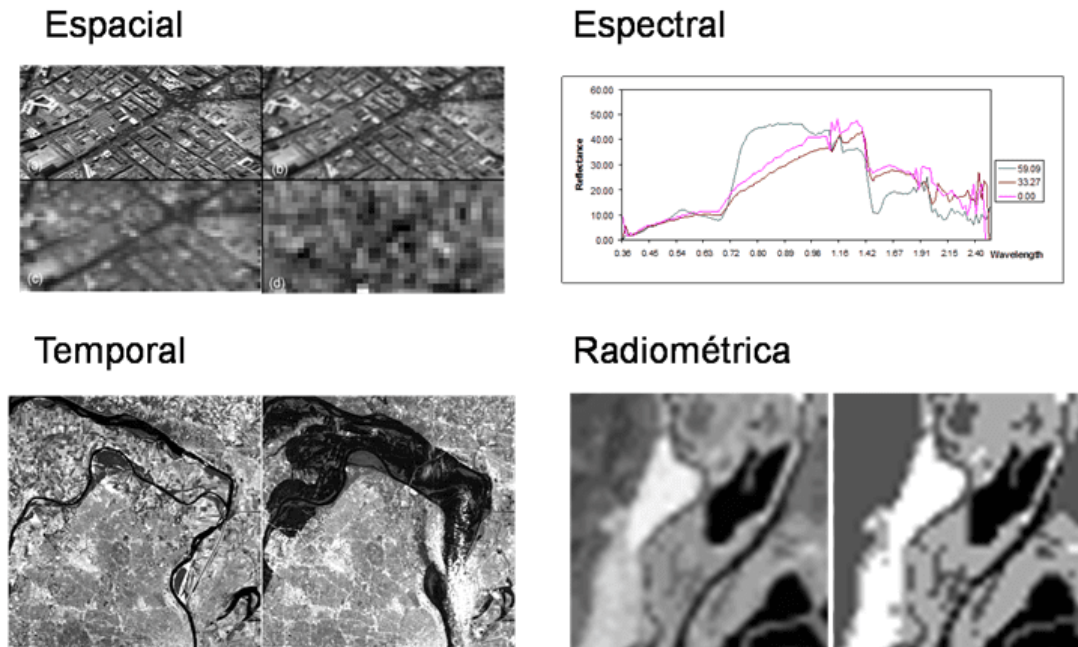


Figura 6. Tipos de resoluciones de imágenes, obtenida de <https://ingeoexpert.com/articulo/21969/>

Fotogrametría mediante el uso de VANT

El uso de la Fotogrametría mediante el uso de VANT ha sido una gran alternativa de obtención de información geográfica para proyectos de investigación con respecto a los métodos tradicionales como son levantamientos topográficos por Estación Total y equipos de Sistema de posicionamiento Global/Sistema Satelital de Navegación Global (GPS/GNSS por sus siglas en inglés), análisis de imágenes y modelos satelitales gratuitos y servicios de paga.

A continuación, se mencionan algunos acontecimientos históricos en la era moderna de la implementación de la fotogrametría:

1. En la década de los 90's se realiza un estudio para detectar un mosaico hidrológico y evidenciar el impacto del ser humano en cuestiones hidrológicas, este estudio fue apoyando mediante herramientas SIG, con la finalidad de determinar un área como posible zona de recarga o descarga de aguas subterráneas, para ello, se realizaron superposiciones de mapas para determinar la respuesta hidrológica (Andersson & Sivertun, 1991).

2. En la década de los 2000's, se realizaron trabajos en cultivos para identificar la presencia de nitrógeno, utilizando los VANT y fotogrametría, realizando comparaciones en técnicas de recuperación de clorofila multiespectrales basadas en la tierra, con la finalidad de detectar la deficiencia y exceso de nitrógeno y sus consecuencias en la contaminación de nutrientes y escorrentías (Zhu, 2009).

Es por ello que en los últimos años la implementación de estos equipos para la realización de estudios científicos y otras áreas ha sido una opción accesible y práctica para la recopilación de información, que en cuestiones de restituciones fotogramétricas, la técnica más empleada para la obtención de nube de puntos, MDE y ortomosaicos es el método Structure from Motion (SfM)

Structure from Motion (SfM)

El SfM es un método fotogramétrico para la creación de modelos tridimensionales del relieve a partir de la obtención de fotografías bidimensionales capturadas desde diversas ubicaciones y orientaciones para la reconstrucción de este. Este método se ha hecho presente en varias formas desde la década de los 70's (Ullman, 1979), sin embargo, su aplicación fue poco común sino hasta principios de los años 2000 (Snavely et al., 2008).

La aplicación de este método, al igual que el uso de la fotogrametría, es de gran apoyo en muchos subcampos de las geociencias, como son:

1. Geomorfología
2. Geología estructural
3. Tectónica
4. Geodesia
5. Minería
6. Entre otros

El SfM en generación de datos de nubes de puntos densa es muy similar al resultado obtenido por métodos LiDAR aéreos o terrestres (figura 7).

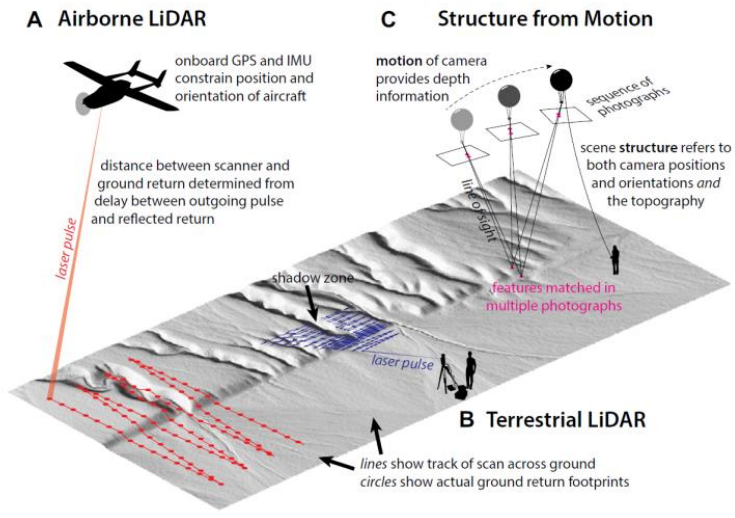


Figura 7. Comparación de SfM con los métodos LiDAR terrestres y aéreos. Fuente: Johnson et al., (2014).

El método SfM utiliza una proyección cónica para la generación de una nube de puntos (Hartley & Adrew, 2004) utilizando imágenes en ubicaciones diferentes, simulando el proceso del cerebro el cual reconstruye objetos tridimensionales a partir de la proyección de imágenes 2D (Pereira, 2013).

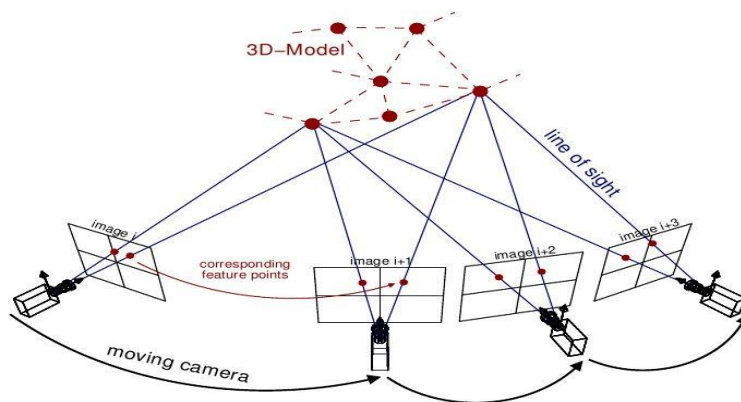


Figura 8. Principio básico del SfM

Uso de VANT en Ingeniería Civil

La implementación de VANT en ingeniería civil ha sido un gran avance en las diversas aplicaciones que relacionan esta materia, encontrando nuevas formas de adquisición de datos, mencionando algunas de las ramas de la ingeniería en las cuales se han utilizado este tipo de herramientas, como son:

1. Ingeniería de la construcción: Seguimiento de obra civiles y procesos constructivos
2. Ingeniería del terreno: Obtención de imágenes para la caracterización de la geología del lugar, comúnmente en lugares de difícil acceso.
3. Ingeniería de carreteras: Realización de aforos y diseños geométricos.
4. Ingeniería estructural: Inspección de estructuras cuyo acceso es complicado y riesgoso para el personal.
5. Ingeniería hidrológica: Conocer las características de cuencas y sus escurrimientos, así como elementos existentes que pueden influir en su comportamiento hidráulico.

Si bien es cierto que el uso de VANT ha sido una de las tendencias y opciones viables para la ejecución de proyectos, también pueden presentarse algunas desventajas al utilizar estos tipos de equipos, tal como se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del uso de VANT.

Ventajas de uso de VANT	Desventajas de uso de VANT
<ul style="list-style-type: none"> • Permite la obtención de imágenes de alta resolución 	<ul style="list-style-type: none"> • Gran inversión inicial para su adquisición y los elementos requeridos para la ejecución de proyectos
<ul style="list-style-type: none"> • Reduce costos en los servicios a ofrecer 	<ul style="list-style-type: none"> • La superficie o distancias no suelen ser de grandes extensiones por las capacidades del VANT
<ul style="list-style-type: none"> • Permite acceder a sitios de difícil acceso 	<ul style="list-style-type: none"> • Requieren personal capacitado para el manejo
<ul style="list-style-type: none"> • Permiten entregar un producto mucho más definido y con mayor rapidez. 	<ul style="list-style-type: none"> • En ocasiones el vuelo se puede ver limitado por motivos de espacios aéreos

Implementación de herramientas SIG para ingeniería civil

Dentro de la ingeniería civil existen diversas áreas en las cuales la aplicación de herramientas SIG son de gran importancia para la obtención de datos y desarrollo de los proyectos, algunos ejemplos son:

1. Planeación de protección ambiental.
2. Ordenamiento urbano y territorial
3. Ciencias ambientales
4. Catastro
5. Topografía
6. Geografía
7. Hidrología superficial y subterránea
8. Gestión de redes de servicios públicos
9. Otros

En resumen, los programas SIG pueden implementarse en cualquier proyecto que use información geográfica, es decir, elementos que describan el "mundo real" (España, 2017) obteniendo información de diversas fuentes de información que ayuden al desarrollo de proyectos.

Y como ya se ha mencionado, los VANT son una fuente viable para la obtención de información, que en conjuntos de herramientas SIG, han permitido mejorar la información para la ejecución de proyectos y los productos a realizar, los cuales, algunos productos que se pueden utilizar en los tipos de proyectos ya mencionados son:

1. Fotointerpretación e información espacial.
2. Modelaciones 2D y 3D.
3. Productos cartográficos, MDE, mapas catastrales.
4. Geometría vial.
5. Cálculo de parámetros geométricos y caracterización
6. Otros.

Cuencas Hidrográficas

La cuenca hidrográfica es el área de una superficie terrestre el cual cuenta con una red de escorrentías que aportan agua a un punto de descarga o punto de cierre las cuales se presentan al producirse una precipitación pluvial u otros tipos de aportación de agua, como ejemplo los deshielos (figura 9).

El proceso de los escurrimientos comienza por el desplazamiento del agua en dirección a la pendiente por medio de la gravedad y hacia puntos de menor elevación, los escurrimientos que han permanecido sobre la superficie se le denominan escurrimientos superficiales, mientras que aquellos que se han infiltrado a través del suelo y discurren por su interior denominan escurrimientos subsuperficiales o subterráneos.

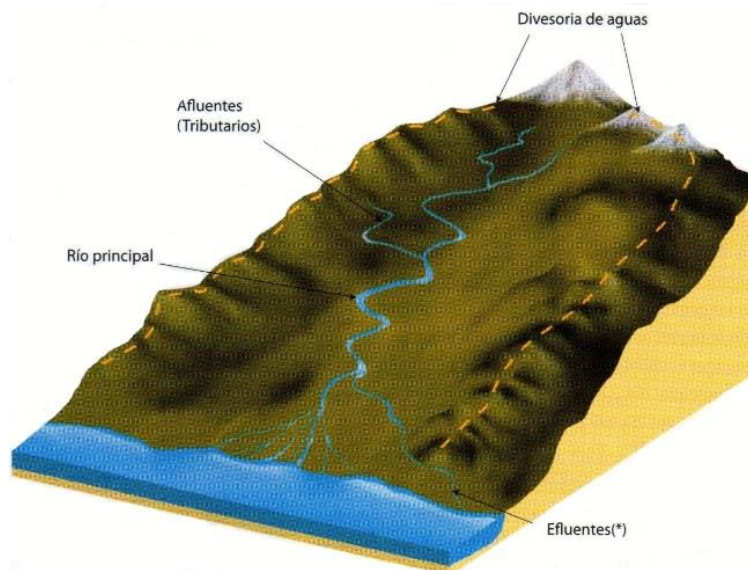


Figura 9. Representación general de una cuenca, obtenida de <https://infoagro.com.ar/cuencas-hidrograficas-un-modelo-para-planificacion-y-analisis-hidrologico/>

Tipos de cuencas

Los tipos de cuencas se pueden clasificar dependiendo al cuerpo de agua en el que llegan los escurrimientos (figura 10) y se mencionarán a continuación:

- Cuencas exorreicas

Este tipo de cuenca descarga escurrimientos superficiales hacia los mares u océanos, también conocidas como cuencas abiertas.

- Cuencas endorreicas

Cuencas cuyas aguas desembocan en cuerpos de aguas que no tienen comunicación con mares u océanos, si no desembocan en lagunas, lagos o salares, estas cuencas también son conocidas como cuencas cerradas.

- Cuencas arreicas

Las aguas que fluyen en estas cuencas se evaporan y/o se infiltran en el terreno antes de encontrarse en un cuerpo de agua.

- Cuencas criptorreicas

Tipo de cuenca que no posee ningún tipo de conexión aparente con ríos o flujo de agua que muevan el líquido estancado dentro de la propia cuenca y fluye subterráneamente.



Figura 10. Representación de los tipos de cuencas, obtenida de <https://www.rojotse.com.co/2020/10/que-son-los-rios.html>

A su vez, las cuencas hidrográficas tienen diversas clasificaciones dependiendo de su superficie (tabla 5) y estas clasificaciones se describen a continuación:

- Cuenca: Sistema conformado por subcuencas y/o microcuencas.
- Subcuencas: Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal.
- Microcuencas: Área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una subcuenca; es decir, que una Subcuenca está dividida en varias microcuencas.

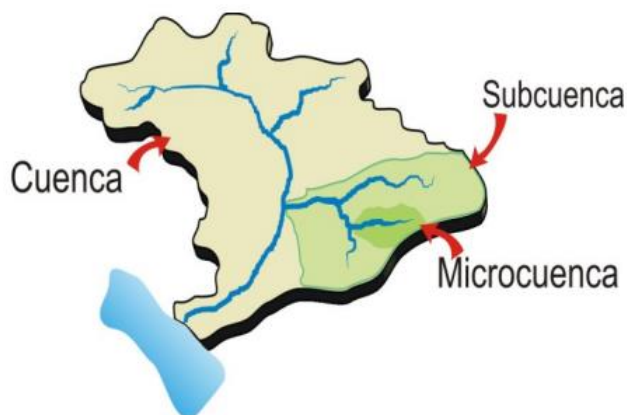


Figura 11. Representación de cuenca, subcuenca y microcuenca, fuente: Adaptada por Casaverde, 2011

Tabla 5. Clasificación de cuencas con respecto a su superficie, fuente: Campos Aranda (1992).

Rangos de superficie (Km ²)	Clasificación
<25	Microcuenca
25-250	Pequeña
250-500	Intermedia-pequeña
500-2500	Intermedia-grande
2500-5000	Grande
>5000	Muy grande

Morfometría de una cuenca

La morfometría de cuencas constituye una importante herramienta para evaluar el funcionamiento del sistema hidrológico de una región (Maidment, 1992; Verstappen, 1983; Campos, 1992; Gregory y Walling, 1985; Fuentes Junco, 2004), y así contribuir al manejo y gestión de los recursos naturales.

El comportamiento de los caudales de una cuenca se relaciona directamente con las características físicas de esta. Los parámetros morfométricos de una cuenca son uno de los principales datos a conocer en la realización de estudios hidrológicos e hidráulicos. El análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables de superficie, lineales, de relieve y drenaje que permite conocer las características físicas de una cuenca, determinando su comportamiento hidrológico (Gaspari, 2012).

Parámetros asociados a la forma de la cuenca

Los parámetros asociados a la forma de la cuenca son un conjunto de variables lineales, de superficie, de relieve y drenaje que permiten conocer las sus características físicas con la finalidad de conocer su comportamiento hidrológico y establecer estrategias de manejo. Es por ello que a continuación se mencionan algunos de estos parámetros.

- Área

Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; este parámetro se expresa habitualmente en km² o hectáreas.

- Perímetro

Es la longitud sobre un plano horizontal, delimitando la cuenca, comúnmente las unidades se expresan en kilómetros.

- Longitud del cauce principal

Se define como la distancia equivalente que recorre el río entre el punto de desagüe aguas abajo y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba, distancia expresada en kilómetros.

- Longitud de la cuenca

Se define por la distancia horizontal medida a lo largo del cauce principal, entre el punto de salido o desfogue de la cuenca, hasta el límite definido, esta longitud se mide en kilómetros.

- Tiempo de concentración (Kirpich)

Tiempo mínimo necesario en el cual todos los puntos de una cuenca aportan agua en los escurrimientos de forma simultánea al punto de salida o desfogue, representando el momento en el cual el caudal de escurrimiento es constante, este tiempo es expresado en horas (Hr).

$$Tc = 0.066 \left(\frac{Lc}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$$

Donde:

- Tc: Tiempo de concentración
- Lc: Longitud del cauce principal (Km)
- S: Pendiente media del cauce principal (m/m)

- Coeficiente de compacidad (Gravelius, 1914)

Este coeficiente se estima a partir de la comparación de una cuenca con una circunferencia, el cual éste presenta la misma área que la cuenca de interés. Este coeficiente define el nivel de concentración de volúmenes de aguas de escurrimientos, el cuál relaciona el perímetro de cuenca y el perímetro de la circunferencia.

Los valores del coeficiente de compacidad siempre serán mayores a 1. Éste índice indica la tendencia de concentrar fuentes volúmenes de agua de escurrimientos, presentando mayores concentraciones cuando el valor tiende a 1, caso contrario en cuencas alargadas donde se presentan menores concentraciones y el coeficiente aumenta.

El coeficiente de compacidad se expresa de la siguiente manera:

$$Kc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Donde:

- Kc: Coeficiente de compacidad
- P: Perímetro de la cuenca
- A: Área de la cuenca

Se han establecido cuatro categorías para la clasificación de acuerdo con este parámetro que se describen en la tabla 6 y como se muestran en la figura 12.

Tabla 6. Características de la cuenca de acuerdo con el valor kc.

Valores de Kc	Forma
1.00-1.25	Redonda a oval redonda
1.25-1.50	De oval redonda a oval oblonga
1.50-1.75	De oval oblonga (alargada) a rectangular oblonga
>1.75	Rectangular

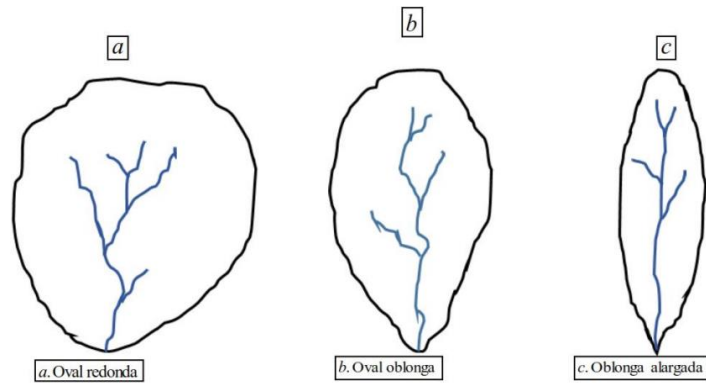


Figura 12. Esquema de modelos de formas de cuenca según rangos del coeficiente de Gravelius Fuente: Ortiz, S. 2016.

- Factor de Forma de Horton

Es la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca, el cual describe el alargamiento de la cuenca, expresada de la siguiente manera:

$$Kf = \frac{A}{L^2}$$

Donde:

- Kf: Factor de Horton
- A: Área de la cuenca
- L: longitud de la cuenca

Si la forma de la cuenca es aproximadamente circular, entonces el valor de Kf se tenderá al valor 1. Por el contrario de las cuencas más alargadas que tendrán un Kf menor. En las cuencas alargadas, las descargas son de menor volumen debido a que el cauce a principal es más largo que los cauces secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos, como se muestra en la figura 13. Este caso es inverso a lo que ocurre con el coeficiente de compacidad.

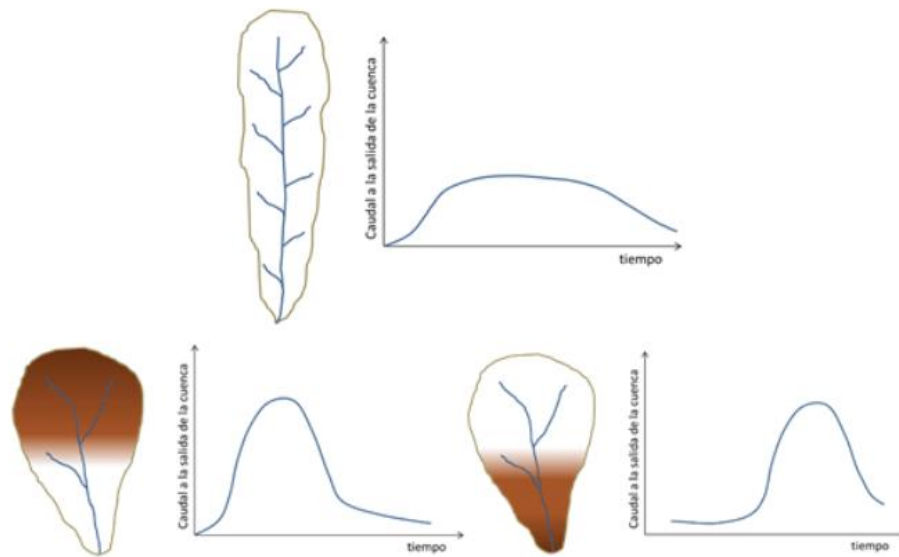


Figura 13. Influencia de la configuración de la red hidrológica en las descargas, fuente: Córdova, 2016.

Tabla 7. Rangos aproximados del factor de forma de Horton, fuente: Pérez, 1979.

Factor de forma (valores aproximados)	Forma de la cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22-0.30	Alargada
0.30-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.60	Ligeramente ensanchada
0.60-0.80	Ensanchada
0.80-1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

- Relación de elongación (Re)

Se define como la relación entre el diámetro de un círculo que posea la misma área de la cuenca y cuyo diámetro sea igual la longitud de la cuenca y su formulación matemática es la siguiente:

$$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$$

Donde

- R_e : Relación de elongación
- A: Área de la cuenca
- L: Longitud de la cuenca

Cuando el valor de la relación de elongación tiende a 1, esto indica que la cuenca es muy plana y circular, cuando la cuenca es plana con porciones accidentales, la relación de elongación se encuentra entre 0.5 y 0.8.

- Orden de los cauces (Strahler, 1964)

El método de Strahler es una técnica para la clasificación de arroyos de una cuenca, los arroyos más pequeños, portadores de aguas de nacimiento y sin afluentes se les denomina "primer orden". Cuando dos corrientes de primer orden se unen para formar un arroyo más grande, se denomina de "segundo orden", dos corrientes de segundo orden se unen para formar una "tercera orden", y así sucesivamente. Pequeñas corrientes de entrada a una secuencia de orden mayor no cambian su número de orden (figura 14).

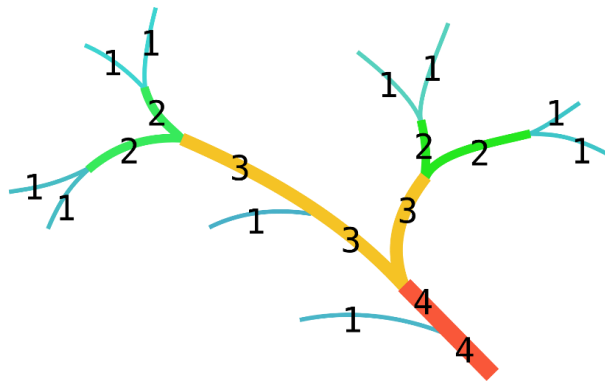


Figura 14. Orden de cauces por el método de Strahler.

Zona de estudio

La zona de estudio se encuentra dentro de la ciudad de Mexicali, Baja California, abarcando mayormente la colonia "El Vidrio" (figura 15) colindando con el Río Nuevo, río intraurbano que atraviesa la ciudad. Al encontrarse aledaño al cauce del Río Nuevo, esta zona presenta los niveles de elevación más bajas de la ciudad, inclusive por debajo del nivel medio del mar.

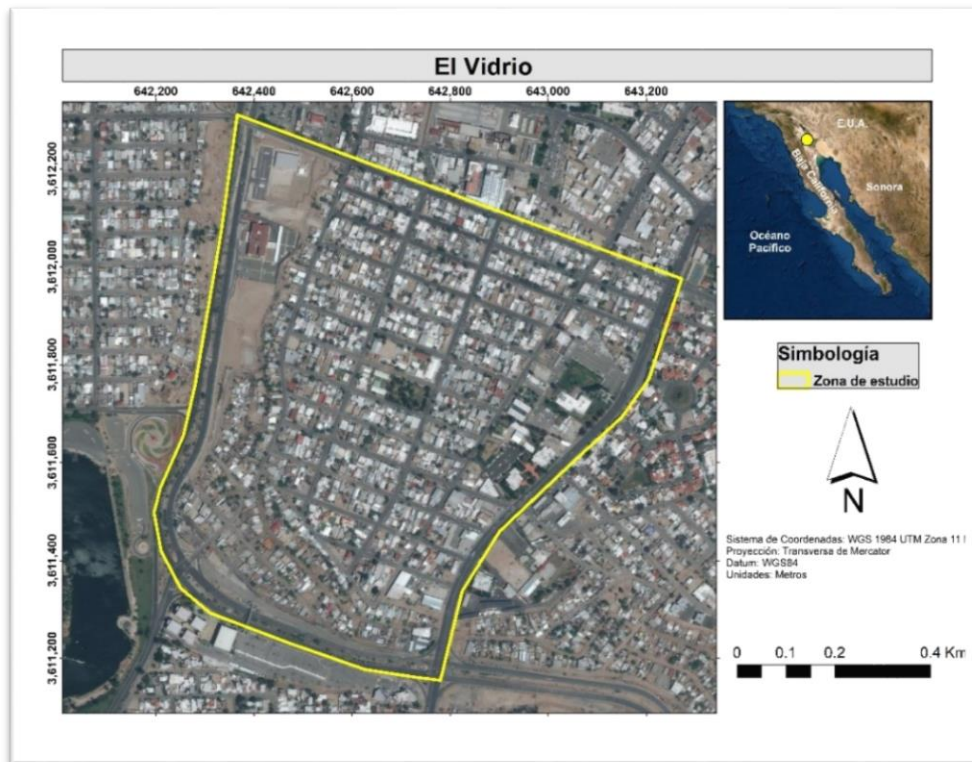


Figura 15. Localización de la zona de estudio.

Históricamente, esta zona ha presentado diversos problemas de inundaciones, ya que como se mencionó, esta se encuentra por niveles debajo del nivel medio del mar, además de no contar con un adecuado sistema de drenaje pluvial, que, por consecuencia, a través de los años se han presentado diversos problemas, como afectaciones de viviendas, así como peligro para la población.

Medio físico

La zona del “El Vidrio” se encuentra dentro de la cuenca del “*Salton Sea*”, cuenca transfronteriza con Estados Unidos, que a su vez forma parte del Delta del Río Colorado. Su clima como el predominante en la ciudad, es de tipo muy seco, el cual se presenta temperaturas muy extremas en las diferentes épocas del año. Las temperaturas medias más altas se presentan en los meses de julio y agosto apenas menores a 32 °C y la mínima mensual se presenta en enero que oscila entre 11 y 14 °C (CEA, 2008).

En cuanto a los eventos de precipitación presentan un total anual entre los 20 a 60mm, registrado el mes de septiembre como el mes con mayores milímetros de precipitación por el contrario de los meses de mayo y junio, presentando los menores.

A su vez, el uso del suelo de la zona de estudio es de área urbana, ya que esta zona se encuentra en su totalidad dentro de la ciudad, que, por consecuencia de este uso de suelo, se cuenta con pavimentación en una gran cantidad de las vialidades, modificando su coeficiente de escurrimiento (C), haciendo la superficie más impermeable, sin permitir la filtración del agua hacia el suelo y generando mayores escurrimientos superficiales que generar problemas a la población.

Eventos de Inundación en El Vidrio

De acuerdo con diversas fuentes hemerográfica, históricamente la zona del El Vidrio ha presentado múltiples inundaciones a lo largo del tiempo, que a continuación se mencionarán algunas referencias.

El diario “El Imparcial” en enero de 2016, presentó una nota la cual describe las dificultades de la ciudadanía que viven en dicha zona, haciendo énfasis con los problemas de inundación (figura 16), causando pérdidas materiales y afectaciones en los hogares de los residentes.

El Diario “La voz de la frontera” de septiembre de 2018 describe los riesgos que pueden presentarse en la zona debido a las lluvias (figura 17), e incluso, se realizaron propuestas a sus residentes de reubicarlos a otras zonas, ya que se le considera una zona de alto riesgo a partir del terremoto sucedido el 4 de abril de 2010, ya que fue una de las zonas con mayor afectación.

Posteriormente, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Mexicali (CESPM) en septiembre del 2020 publicó en su portal que en colaboración con la Secretaría para el Manejo, Saneamiento y Protección del Agua (SEPROA) se reunieron con los pobladores de la zona de “El Vidrio” y la colonia y “Agualeguas” (figura 18), en la cual, los colonos dieron a conocer una serie de problemáticas que se presentan en la zona en épocas de lluvias, que, para ello, las autoridades propusieron la creación de infraestructura tradicional con la red pluvial y complementarla con un sistema híbrido de retención de volúmenes de agua.



Figura 16. Nota periodística sobre problemas de inundaciones, diario “El Imparcial.”.

LOCAL / JUEVES 27 DE SEPTIEMBRE DE 2018

Tiene riesgo “El Vidrio” de daños por lluvias

Fundada hace más de 30 años de manera irregular en lo que fue el lecho del Río Nuevo



Figura 17. Nota periodística diario “La voz de la frontera” sobre riesgos de daños por lluvias.

CESPM Y SEPROA SE REÚNEN CON HABITANTES DE LAS COLONIAS AGUALEGUAS Y EL VIDRIO DE MEXICALI



Mexicali, Baja California a 21 de Septiembre del 2020

Figura 18. Reunión de autoridades con ciudadanos por problemática de inundaciones, Fuente: CESPM.

Capítulo III Materiales y Métodos

Para la realización de este trabajo se llevaron a cabo diversas fases, la primera fase se basó en antecedentes de inundaciones de la zona, localizando los sitios que presentan mayores problemas en épocas de lluvias, delimitando la zona de “El Vidrio” que abarca diversas colonias, con una superficie aproximada de 0.75Km².

Como segunda fase, se realizó un plan de vuelo para la utilización de un VANT marca DJI modelo Mavic Pro (figura 19), con el cual se obtuvieron un paquete de fotografías ortogonales, dicho plan se generó previamente a las actividades de campo. Posteriormente, se realizó la colocación de PCT distribuidos en la zona de estudio, con la finalidad de optimizar el MDE y obtener precisiones centimétricas para finalmente ejecutar el vuelo para la obtención de las fotografías aéreas.



Figura 19. VANT marca DJI modelo Mavic Pro

Una vez concluida las actividades con el VANT, se procedió a la generación del MDE, utilizando el programa especializado de fotogrametría Agisoft Metashape versión 1.6.0. para posteriormente utilizar los programas SIG, ArcGIS versión 10.3, Global Mapper versión 21.1 y SAGA GIS versión 2.3.2 para la generación de las microcuencas y escurrimientos superficiales, realizando una comparación de resultados entre los tres programas.

Planificación de vuelo fotogramétrico

La realización del vuelo fotogramétrico comienza desde un análisis de la superficie total para la captura de fotografías aéreas para consiguiente realizar un plan de vuelo con la aplicación

Pix4dCapture, el cual nos permite planificar y manipular diversas variables, como el tipo de vuelo, altura y porcentaje de traslape entre fotografías, mostrando los parámetros utilizados en la tabla 8.

Tabla 8. especificaciones de parámetros utilizados para vuelo fotogramétrico.

Superficie Total	0.75 Km ²
Cantidad de vuelos	7
Tiempo promedio por vuelo	20 min
Altura de vuelo	100 m
Ángulo de posición de cámara	90°
Porcentaje de traslape entre fotografías	80%

Adicionalmente a estos parámetros, también se deben contemplar las condiciones meteorológicas en la región para la toma de decisiones y realización de vuelos eficientes para la obtención de imágenes de buena calidad.

Distribución de PCTs

Una vez determinada la superficie a abarcar, se procedió a indicar la ubicación preliminar de los PCTs dentro del área de vuelo, con una distribución adecuada para la mejor optimización y calibración del MDE a generar, en el caso de estudio se establecieron 8 PCTs, utilizando el programa Google Earth (figura 20).



Figura 20. Distribución de PCTs en la zona de estudio.

Ejecución del plan de vuelo

Como primer paso se procedió a realizar la colocación de marcas físicas de los PCTs, para ello se colocaron marcas con pintura en la ubicación aproximada en la planificación previa, colocando marcas de pintura en forma de cruz cuyas dimensiones fueron de aproximadamente de 1m², dimensiones adecuadas para ser observadas en las fotografías aéreas.

Como segundo paso, se realizó el levantamiento topográfico de las marcas colocadas, para ellos se utilizó un equipo GPS marca Trimble modelo R7 doble frecuencia en modalidad RTK (*Real Time Kinematic*) (figura 21), el cual el receptor base se colocó sobre el vértice geodésico CAT40, perteneciente a la red de catastro del municipio de Mexicali e incorporada a la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP) perteneciente al INEGI, con coordenadas conocidas (tabla 9).



Figura 21. Equipo GPS marca Trimble, modelo R7.

Tabla 9. Coordenadas del vértice CAT40, marco de referencia ITRF08, época 2010.0.

ID	Norte	Este	Elevación
CAT40	3612472.263	643067.811	1.296

Una vez colocado el receptor base en el CAT40, se llevó a cabo el levantamiento topográfico de los PCTs previamente marcados dentro de la zona de estudio, utilizando el receptor móvil, que como resultado se obtuvieron las coordenadas Norte, Este y la elevación de cada una de ellas, mostradas en la tabla 10.

Tabla 10. Lista de coordenadas de PCTs.

ID de punto	Norte	Este	Elevación
pct1	3612239.836	642402.113	-6.878
pct2	3612037.014	642872.413	2.647
pct3	3611944.118	643159.628	3.120
pct4	3611838.009	642335.515	-5.896
pct5	3611730.104	642652.307	2.474
pct6	3611662.419	642831.696	2.523
pct7	3611448.006	642304.445	-6.827
pct8	3611323.818	642628.049	2.505

Por último, se procedió a realizar los vuelos fotogramétricos, obteniendo un total de 1,275 fotografías, verificando que la calidad de imagen obtenida sea la adecuada (figura 22) para la realización del MDE.



Figura 22. Verificación de calidad de imagen, vista a marca de PCT.

Procesamiento de datos y generación de MDE

El procesamiento de los datos se refiere a la unión de las imágenes georreferenciadas y se puede resumir en tres etapas (Ezat, et al., 2018).

1. Calibración de los datos,
2. Reemplazo de la nube de puntos
3. Generación del MDE

Las imágenes de los vuelos fueron procesadas fotogramétricamente con el programa Agisoft Metashape versión 1.6.0, el cuál es uno de los programas más relevantes en el uso de la fotogrametría y conlleva realizar una serie de pasos que se muestra en la figura 23.

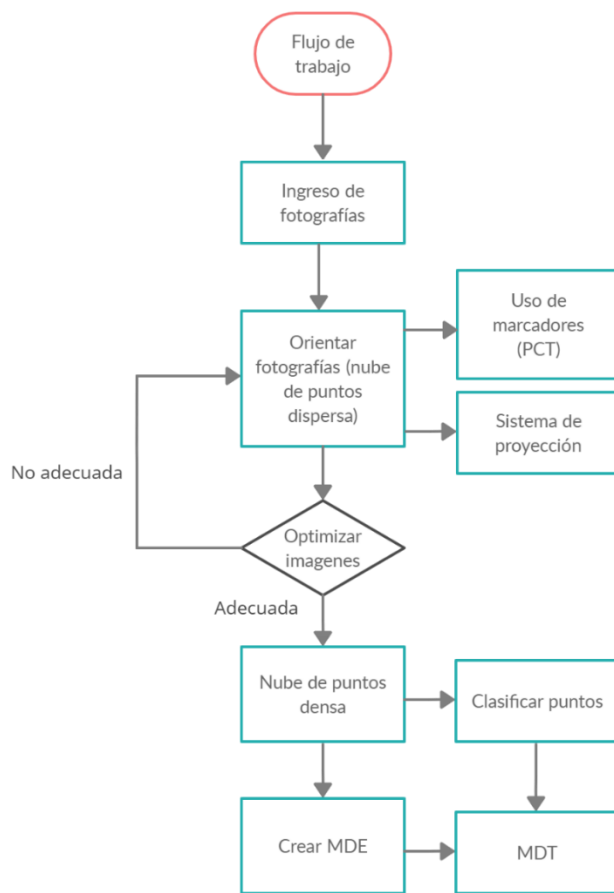


Figura 23. Diagrama de procedimiento fotogramétrico para generación de MDE-MDT, programa Metashape, fuente: Elaboración propia.

1. Calibración de datos

Esta calibración consiste en insertar los parámetros ópticas de las cámaras con la finalidad de realizar una corrección de distorsión en las fotografías, como ventaja, el programa cuenta con un catálogo de cámaras y sus propiedades, ingresando los parámetros de manera automática al momento de ingresar las fotografías, siempre y cuando el modelo de cámara se encuentre dentro de este catálogo.

2. Reemplazo de la nube de puntos

Una vez realizada la calibración de cámaras, se procede a realizar un alineamiento de fotografías con la finalidad de generar una nube de puntos que representa de forma tridimensional la zona de interés, la cual a su vez, esta será calibrada utilizando las coordenadas de los PCTs obtenidas en campo y la identificación de los marcadores colocados que son identificados de manera visual en las fotografías para realizar una optimización de nube de puntos que georeferenciará todos los puntos obtenidos y así poder generar una nube de puntos densa, que a diferencia de la nube de puntos, esta contará con una mayor densidad de puntos que definirá de mejor manera la zona de interés.

3. Generación del MDE

Finalmente, en base a la nube de puntos densa con la optimización adecuada, se procede a generar el MDE, cuya resolución máxima se relaciona al tamaño del GSD, esto dependiendo de la altura con la que se realizó el vuelo y apertura focal de la cámara (la opción de una menor resolución también es posible).

Generación de la red de escurrimientos superficiales

Una vez generado el MDE, este se exporta en formato Raster y se ingresa a los tres programas SIG, ArcGIS, GlobalMapper y SAGA SIG con el objetivo de generar los escurrimientos superficiales y microcuencas, utilizando las herramientas hidrológicas de cada programa.

Para ello, se debe de realizar una serie de pasos los cuales varían entre cada programa.

- ArcGIS

1. Relleno

Rellena hendiduras en una superficie de Raster para corregir imperfecciones en los datos, corrigiendo anomalías que se pudieran presentar en el MDE, también esta herramienta es conocida como *fill*.

2. Dirección de flujo

Una vez corregido el MDE con la herramienta *fill*, se ingresa a la herramienta de dirección de flujo con la finalidad de determinar la dirección de flujo desde cada celda en el Raster, herramienta también conocida como *flow direction*.

3. Acumulación de flujo

El resultado de Acumulación de flujo es un Raster de flujo acumulado para cada celda, determinado por la acumulación del peso de todas las celdas que fluyen hacia cada celda de pendiente descendente (ESRI) esta herramienta también es conocida como *flow accumulation*.

4. Vinculo de curso de agua

Asigna valores únicos a secciones de una red lineal de Raster entre intersecciones. Los vínculos son las secciones de un canal de arroyo que conecta dos cruces sucesivos, un cruce y la salida o un cruce y la división de drenaje., herramienta también conocida como *Stream Link*.

5. Clasificación de escurrimientos y microcuencas

La clasificación de escurrimientos asigna un orden numérico a los escurrimientos que integran a una red. Este método identifica y clasifica los tipos de escurrimientos en base a la cantidad de afluentes.

La herramienta clasificación de escurrimiento tiene dos métodos para asignar órdenes. Estos son los métodos propuestos por Strahler (1957) y Shreve (1966), para esta investigación, se realizó una clasificación por el método de Strahler, ya que es el método más utilizado por especialistas del área en diversos estudios, esta herramienta también es conocida como *Stream Order*, y finalmente realizar la generación de cuencas.

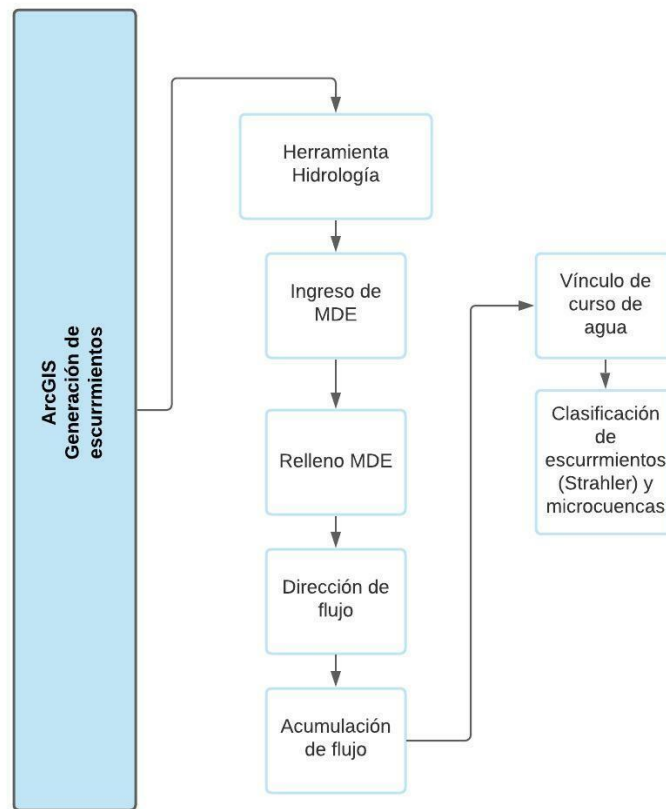


Figura 24. Diagrama de la generación de escurrimiento y microcuencas en el programa ArcGIS, fuente: Elaboración propia.

- GlobalMapper
 1. Generar Cuencas

A diferencia de las herramientas hidrológicas de ArcGIS, el programa GlobalMapper permite la generación de cuencas y escurrimientos en un solo paso, además de permitir establecer parámetros para la generación de estas, como la resolución para la creación de la imagen de la cuenca, datos de umbral de corriente que especifica la cantidad de celdas de flujo se deben de acumular que formen parte de una secuencia para generar escurrimientos, también con opción de establecer el tamaño de microcuencas que se deseen crear y corrección de anomalías del profundidad del MDE, así como la opción de clasificación de escurrimientos por el método de Strahler (Opción disponible a partir del GlobalMapper versión 21).



Figura 25. Diagrama de la generación de escurrimiento y microcuencas en el programa Global Mapper, fuente: Elaboración propia.

- SAGA GIS
 1. Rellenar los vacíos y depresiones

Para la correcta delimitación de las cuencas y escurrimientos el archivo Raster no debe presentar anomalías de sumideros o falta de información, es por ello que antes de realizar los procesos hidrológicos, se deben utilizar herramientas para la corrección del MDE, en el caso del programa SAGA SIG, se utiliza la herramienta *Fill Sinks* (Wang Liu).

2. Generar las cuencas y escurrimientos

Al momento de obtener el MDE corregido, se procede a utilizar las herramientas hidrológicas para la delimitación de cuencas y escurrimientos, utilizando la herramienta *Channel Network and Drainage Basin*, en la cual se ingresa el MDE corregido para finalmente obtener las cuencas y los escurrimientos.



Figura 26. Diagrama de la generación de escurrimiento y microcuencas en el programa SAGA GIS, fuente: Elaboración propia.

Estimación de parámetros morfométricos

Como resultado del generar las microcuencas en la zona de estudio utilizando los programas SIG, se crean polígonos vectoriales (formato shapefile) que representan la forma y dimensiones de estas, y por ello, mediante el uso de herramientas básicas SIG, se pueden estimar algunos parámetros de estas microcuencas, relacionadas a sus formas, tales como son:

1. Área de la microcuenca (A).
2. Perímetro de la microcuenca (P).
3. Longitud de la cuenca (L).
4. Longitud del cauce principal
5. Pendiente media del cauce principal

Adicionalmente, con los parámetros antes mencionados, es posible estimar otros parámetros que describen el comportamiento hidrológico, parámetros que se mencionan en la tabla 11.

Tabla 11. Parámetros asociados a la forma de la cuenca y su comportamiento hidrológico.

Nombre del parámetro	Ecuación
Tiempo de concentración (Kirpich)	$Tc = 0.066 \left(\frac{Lc}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$
Coefficiente de compacidad (Gravelius)	$Kc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$
Factor de forma de Horton	$Kf = \frac{A}{L^2}$
Relación de elongación	$Re = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$

Resultados y discusión

Este capítulo recopila los resultados obtenidos y en la contestación de los objetivos generales y específicos planteados en esta investigación en la zona de estudio de El Vidrio, sin embargo, la metodología empleada no solo se limita a las características de dicha zona, si no también puede ser empleada en diversos escenarios (lugares) con otro tipo de características físicas como son dimensiones (áreas y longitudes), elementos existentes, entre otras, incluso por normativas de vuelo según su tipo de espacio aéreo.

Dicho esto, el primer resultado obtenido es el MDE generado a partir de la implementación de VANT, el cual su principal objetivo es conocer la topografía del sitio de interés, para posteriormente con el producto final obtenido (modelo Raster) se migra a los programas SIG junto con el MDE generado por el INEGI para realizar un comparativo de resoluciones y precisión de información.

El siguiente paso, mediante el uso de las herramientas hidrológicas de cada uno de los programas, se procedió a generar los escurrimientos superficiales y microcuencas de la zona de estudio, utilizando los dos MDE y realizando un comparativo de resultados.

Finalmente, se calcularon algunos parámetros morfométricos de las microcuencas generadas realizando un comparativo de resultados de los diversos MDE y programas SIG.

Modelo Digital de Elevaciones por medio de VANT

Se generó un MDE a partir del procedimiento fotogramétrico utilizando un total de 1,275 fotografías de alta resolución, integrando todas las clasificaciones de puntos obteniendo valores máximos de elevación de 24msnm sobre el nivel del mar y valores mínimos de elevación de -7.5msnm por debajo del nivel del mar (figura 27).

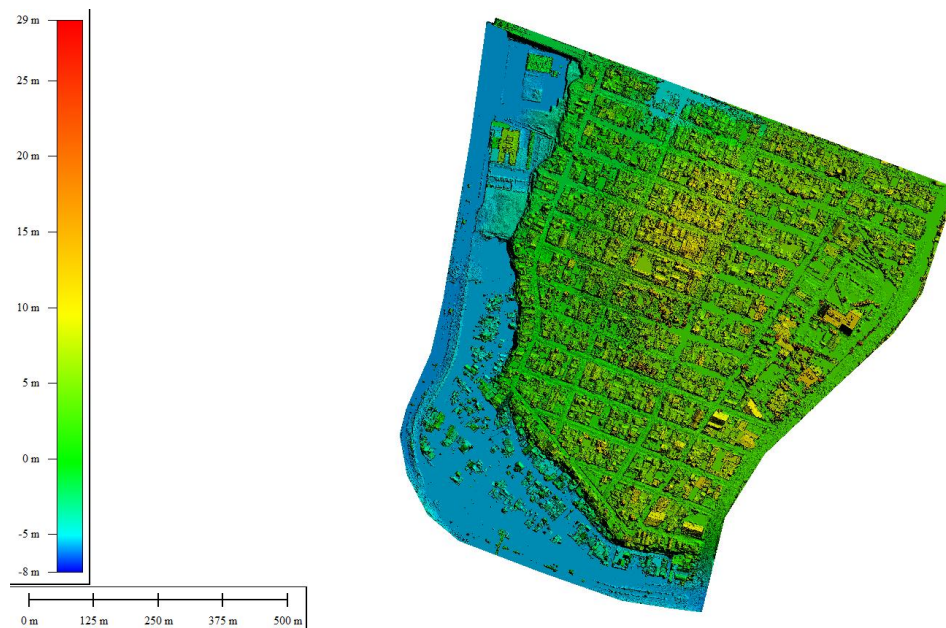


Figura 27. Modelo digital de elevaciones generado por VANT, vista de planta.

Comparación de MDE VANT-INEGI

Se realizó un comparativo entre los MDE (figuras 28 y 29) en cuanto a sus resoluciones, el MDE generado por VANT y proceso fotogramétrico presenta una mejor resolución (0.13m/pix) en comparación al modelo obtenido de las bases de datos del INEGI (5m/pix), incluso apreciando una mejor definición de modelo a simple vista.

Con la notoria mejora en el MDE generado por proceso fotogramétrico en comparación al MDE del INEGI, se presentan algunas diferencias en el rango de elevaciones, ya que el MDE del INEGI dentro del área de estudio presenta una elevación máxima de 14msnm, mientras que el MDE por VANT presenta una elevación máxima de 24msnm, esto debido a la mayor resolución

obtenida en este modelo, presentado esta elevación en la copa de los árboles ubicados en la zona noreste del área de estudio.

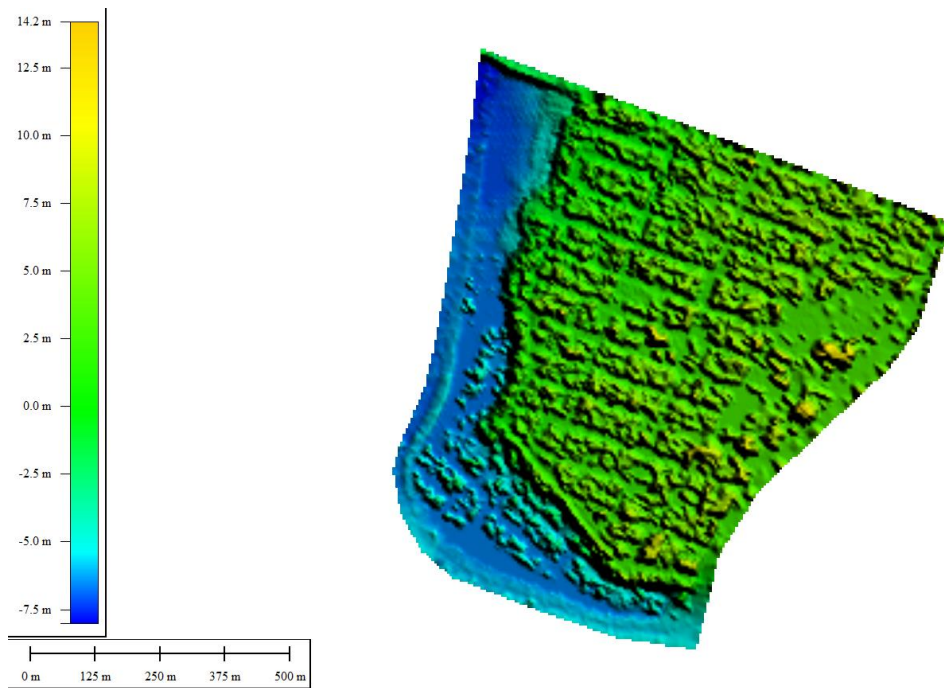


Figura 28. Modelo digital de elevaciones INEGI, resolución 5m.

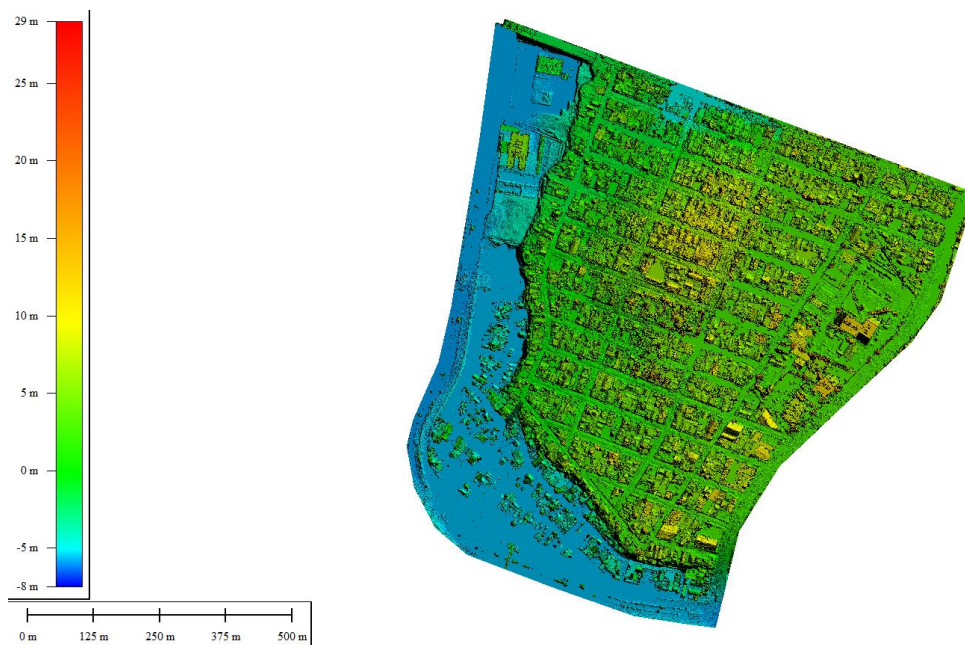


Figura 29. Modelo Digital de Elevaciones VANT, resolución 0.13m.

Generación de escurrimientos y cuencas

Se realizó la generación de escurrimientos superficiales en la zona de estudio en base al MDE generados por VANT y proceso fotogramétrico contra el MDE de INEGI, utilizando tres diferentes programas SIG (ArcGIS, GlobalMapper y SAGA GIS) obteniendo un total de ocho microcuencas generadas por los tres programas ya mencionado (tabla 12) y realizando un comparativo de los resultados obtenidos como se muestran de la figura 30 a la figura 35.

Tabla 12. Resultado de generación microcuencas en los diversos programas y MDE.

Programa	Cantidad de microcuencas generadas	
	VANT	MDE INEGI
ArcGIS	2	2
GlobalMapper	1	1
SAGA GIS	1	1

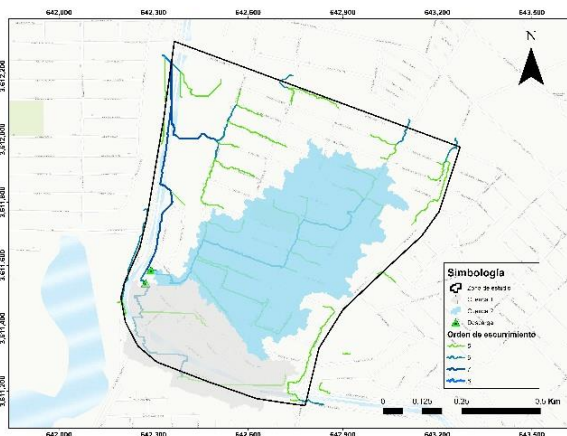


Figura 30. Escurrimientos y microcuencas MDE VANT ArcGIS.

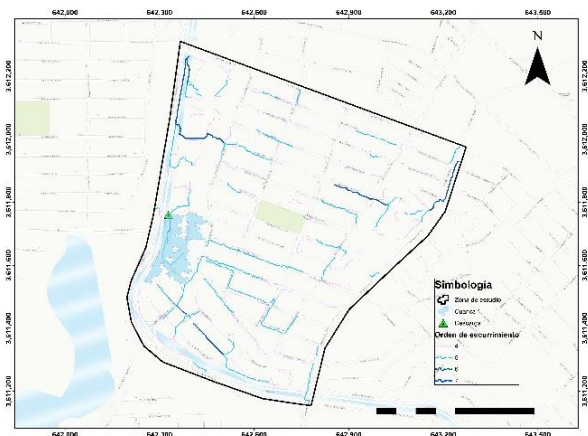


Figura 31. Escurrimientos y microcuencas MDE VANT GlobalMapper.

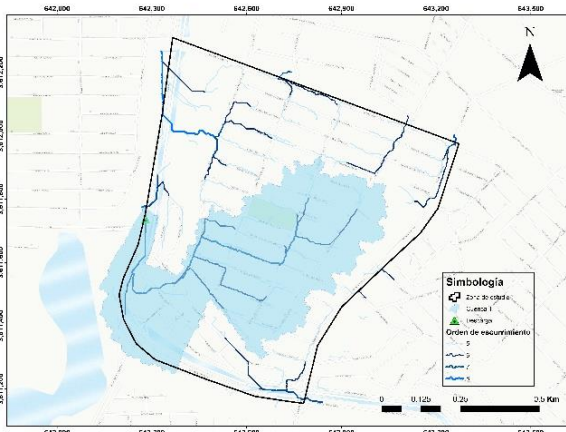


Figura 32. Escurremientos y microcuencas MDE VANT SAGA GIS.

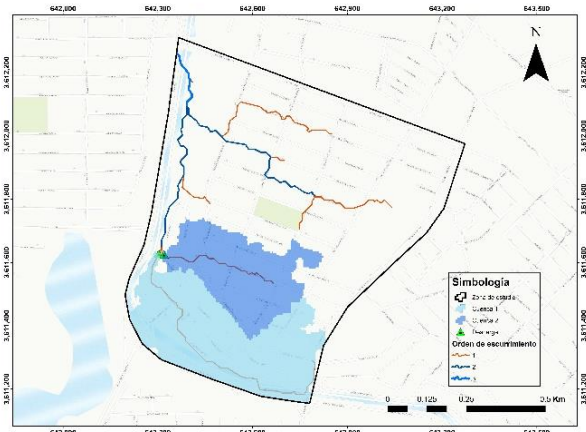


Figura 33. Escurremientos y microcuencas MDE INEGI ArcGIS

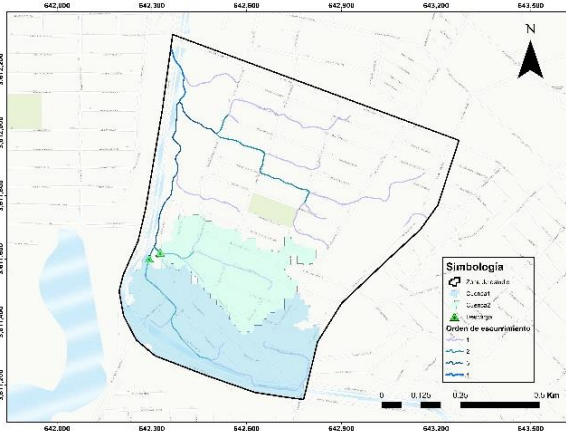


Figura 34. Escurremientos y microcuencas MDE INEGI GlobalMapper.

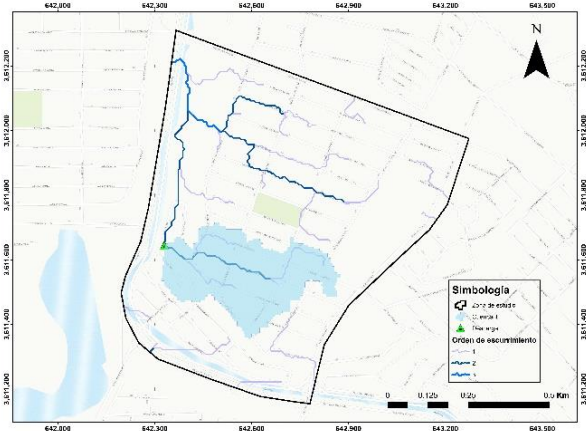


Figura 35. Escurremientos y microcuencas MDE INEGI SAGA GIS.

Podemos observar que los escurrimientos generados a partir del MDE por medio de VANT y proceso fotogramétrico utilizando los programas ArcGIS y SAGA generan un orden de escurrimiento 8, mientras los generados por el programa Global Mapper muestran un orden de escurrimiento 6.

Por otro lado, la generación de los escurrimientos del MDE de INEGI muestra comportamientos muy similares entre los programas ArcGIS y Global Mapper, con la diferencia que el orden de escurrimiento por medio del ArcGIS es de orden 3, mientras que los generados por Global Mapper son de orden 4.

Parámetros morfométricos de las microcuencas

Los parámetros morfométricos primarios como el área, perímetros y longitud de las microcuencas fueron calculados utilizando los programas SIG una vez generadas las microcuencas y escurrimientos, utilizando las herramientas básicas de cálculos geométricos, mostrando los resultados en las tablas 13 y 14.

Adicionalmente se calcularon otros parámetros morfométricos relacionados a la forma de las microcuencas como son: tiempos de concentración, coeficiente de compacidad, factor de forma de Horton y relación de elongación, los cuales estos parámetros permiten describir el comportamiento hidrológico de las microcuencas.

Tabla 13. Parámetros primarios de las microcuencas generadas con los programas SIG y MDE VANT.

Nombre de la microcuenca	Área (km ²)	Perímetro (Km)	Longitud de la microcuenca (Km)	Longitud del cauce principal (Km)	Pendiente media del cauce principal (m/m)
Cuenca 1 MDE VANT ArcGIS	0.12	2.09	0.59	0.39	3.04
Cuenca 2 MDE VANT ArcGIS	0.25	3.87	1.02	1	8.81
Cuenca 1 MDE VANT GlobalMapper	0.02	2.63	0.24	0.24	2.09
Cuenca 2 MDE VANT GlobalMapper					
Cuenca 1 MDE VANT SAGA GIS	0.32	6.88	1.2	0.97	9.72
Cuenca 2 MDE VANT SAGA GIS					

Tabla 14. Parámetros primarios de las microcuencas generadas con los programas SIG y MDE INEGI.

Nombre de la microcuenca	Área (km ²)	Perímetro (Km)	Longitud de la microcuenca (Km)	Longitud del cauce principal (Km)	Pendiente media del cauce principal (m/m)
Cuenca 1 MDE INEGI ArcGIS	0.15	2.33	0.83	0.92	7.76
Cuenca 2 MDE INEGI ArcGIS	0.09	1.86	0.52	0.41	11.55
Cuenca 1 MDE INEGI GlobalMapper	0.15	2.79	0.73	0.39	1.77
Cuenca 2 MDE INEGI GlobalMapper	0.09	2.21	0.48	0.34	12.63
Cuenca 1 MDE INEGI SAGA GIS	0.11	2.28	0.6	0.39	20.35
Cuenca 2 MDE INEGI SAGA GIS					

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración más bajo calculado con los dos MDE y los tres programas SIG fue de 0.60 minutos, este valor se presentó en la microcuenca 1 del MDE del INEGI y el programa SAGA GIS. Este tiempo de corta duración se debe a la relación que hay tanto de la pendiente media del escarmiento principal (20.35 m/m), así como su longitud (0.39Km), mostrando una pendiente muy pronunciada en un distancia relativamente corta, permitiendo un flujo en el que el agua que transcurre en la microcuenca llegue al punto de salida o desfogue en un periodo corto de tiempo.

En cuanto al tiempo de concentración más alto fue de 1.69 minutos, presente en la microcuenca 1 del MDE generado por VANT y el programa ArcGIS, este tiempo de concentración se debe a la pendiente media del escurrimiento principal (3.04m/m), así como su longitud (0.39Km), indicando más tiempo en drenar el agua desde los puntos más alejados, hacía los puntos de salida o desfogue.

Tabla 15. Cálculo de tiempo de concentración.

Programa	Ecuación	Tiempo de concentración (Tc)			
		VANT		INEGI	
		Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 1	Cuenca 2
ArcGIS	$Tc = 0.066 \left(\frac{Lc}{\sqrt{S}} \right)^{0.77}$	1.25	1.71	1.69	0.78
Global Mapper		0.99		1.54	0.65
SAGA GIS		1.61		0.60	

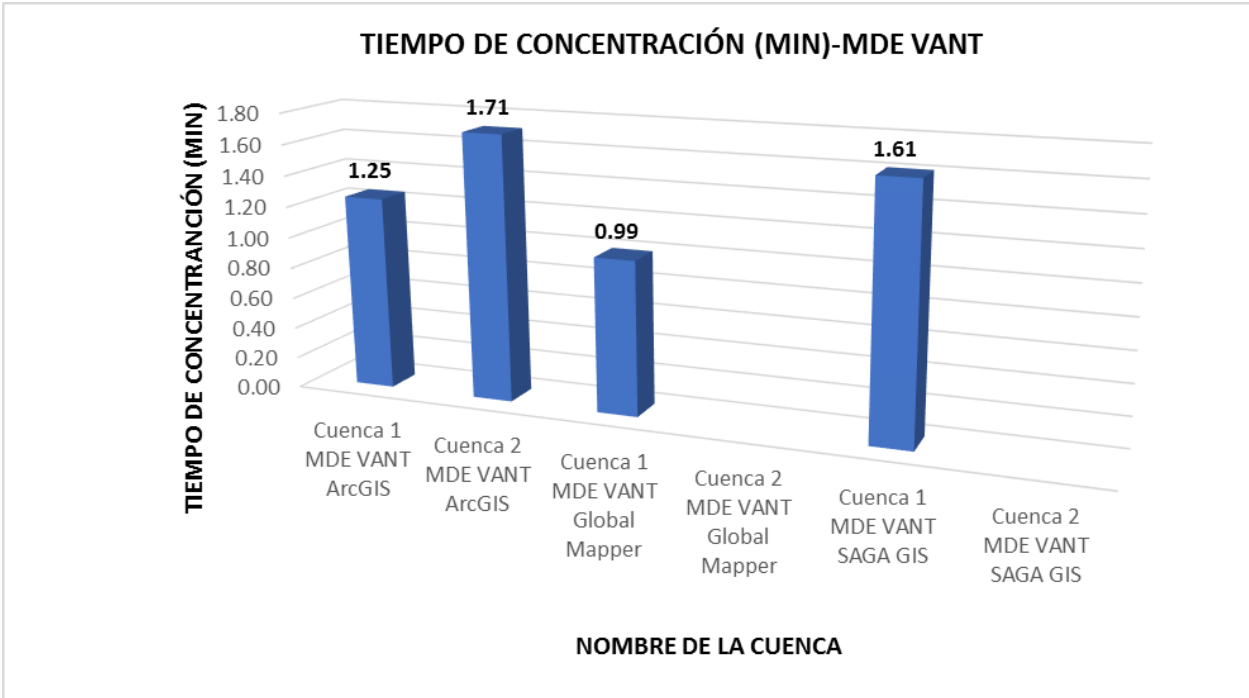


Figura 36. Resultados de tiempo de concentración con el MDE VANT.

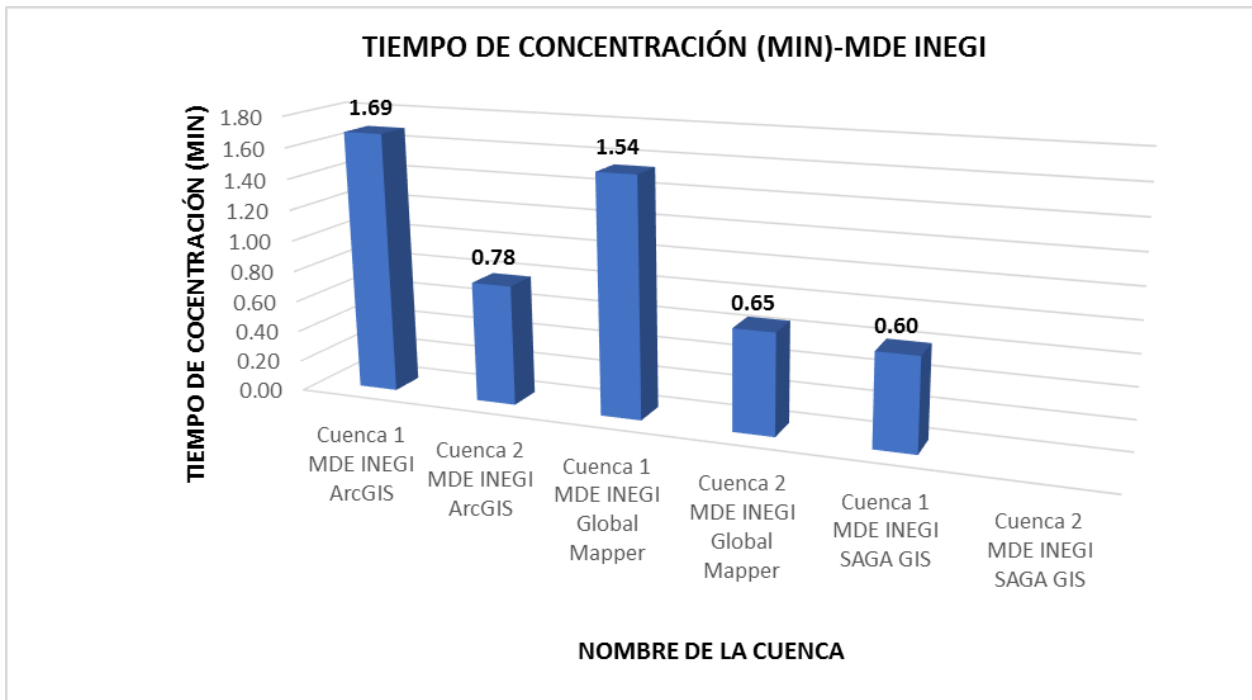


Figura 37. Resultados de tiempo de concentración con el MDE INEGI.

Coeficiente de compacidad

El factor de compacidad más bajo calculado con los dos MDE y los tres programas SIG fue de 1.70 el cual se presentó en dos microcuencas, en la microcuenca 1 del MDE generada con VANT y el programa ArcGIS, como también en la microcuenca 1 del MDE del INEGI con el programa ArcGIS, indicando que son cuencas de forma entre alargada a rectangular oblonga y que presentan menores concentraciones de volúmenes de agua en eventos de precipitación.

El factor de compacidad más alto calculado fue de 5.32 que se presentó en la microcuenca 1 del MDE generado por VANT y el programa GlobalMapper, que en comparación con las microcuencas 1 y 2 generadas con el MDE del INEGI y el programa GlobalMapper, si muestran cambios significativos en los valor (2.03 y 2.08 respectivamente), sin embargo, los resultados de compacidad de ambos modelos y utilizando el mismo programa describen las microcuencas con una forma rectangular (ya que sus valores son mayores a 1.75) indicando que son microcuencas alargadas y presentan menores concentraciones de volúmenes de agua.

Tabla 16. Cálculo de coeficientes de compacidad.

Programa	Ecuación	Coeficiente de compacidad (Kc)			
		VANT		INEGI	
		Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 1	Cuenca 2
ArcGIS		1.70	2.18	1.70	1.75
Global Mapper	$Kc = 0.282 \frac{P}{\sqrt{A}}$	5.32		2.03	2.08
SAGA GIS		3.43		1.94	

COEFICIENTE DE COMPACIDAD-MDE VANT

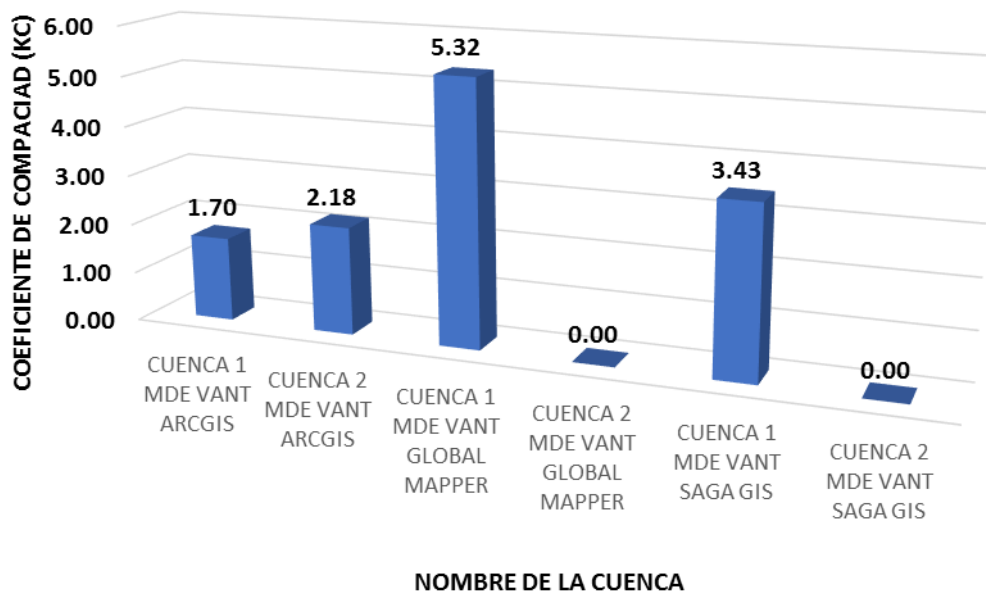


Figura 38. Resultados del coeficiente de compacidad con el MDE VANT.

COEFICIENTE DE COMPACIDAD-MDE INEGI

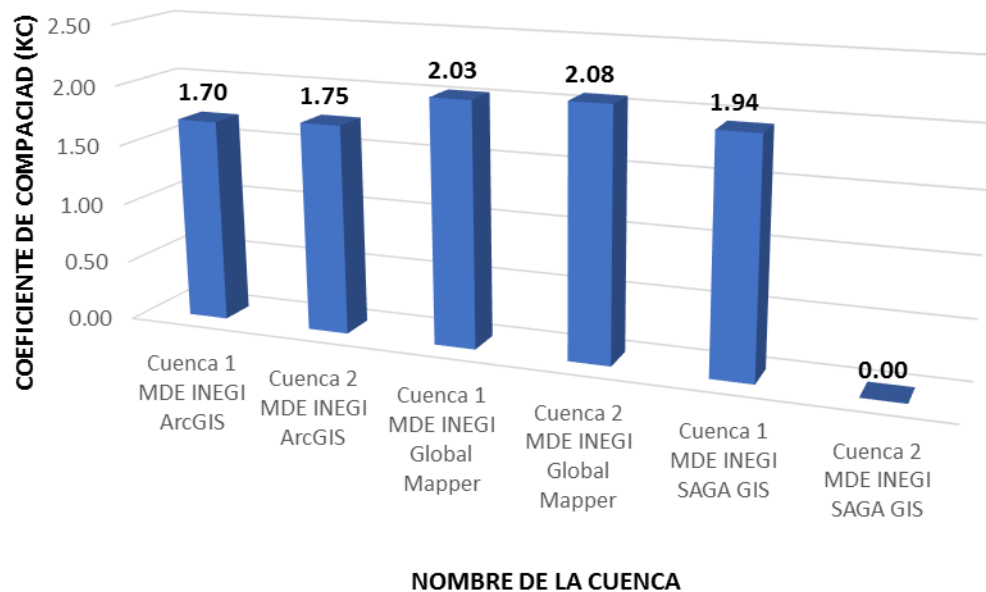


Figura 39. Resultados del coeficiente de compacidad con el MDE INEGI.

Factor de forma de Horton

En cuanto el cálculo del factor de la forma de Horton los resultados obtenidos fueron muy similares utilizando los dos MDE y los tres programas SIG, obteniendo un valor máximo de 0.39, presente en la microcuenca 2 con el MDE del INEGI y el programa GlobalMapper, cuyo valor indica que la cuenca no es “ni alargada ni ensanchada,” teniendo un equilibrio entre los volúmenes de descarga en el cauce principal y los volúmenes de concentración.

El valor mínimo calculado fue de fue de 0.22, cuyo valor se presentó en las microcuencas 1 del MDE del INEGI y el programa ArcGIS, así como la microcuenca 1 del MDE VANT y el programa SAGA GIS, indicando que son cuencas alargadas, presentando menores volúmenes de agua debido a que el cauce principal es más largo que los cauces secundarios y los tiempos de concentración para eventos de precipitación son distintos.

Tabla 17. Cálculo de factor de forma de Horton.

Programa	Ecuación	Factor de forma de Horton (Kf)			
		VANT		INEGI	
		Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 1	Cuenca 2
ArcGIS	$Kf = \frac{A}{L^2}$	0.34	0.24	0.22	0.33
Global Mapper		0.35		0.28	0.39
SAGA GIS		0.22		0.31	

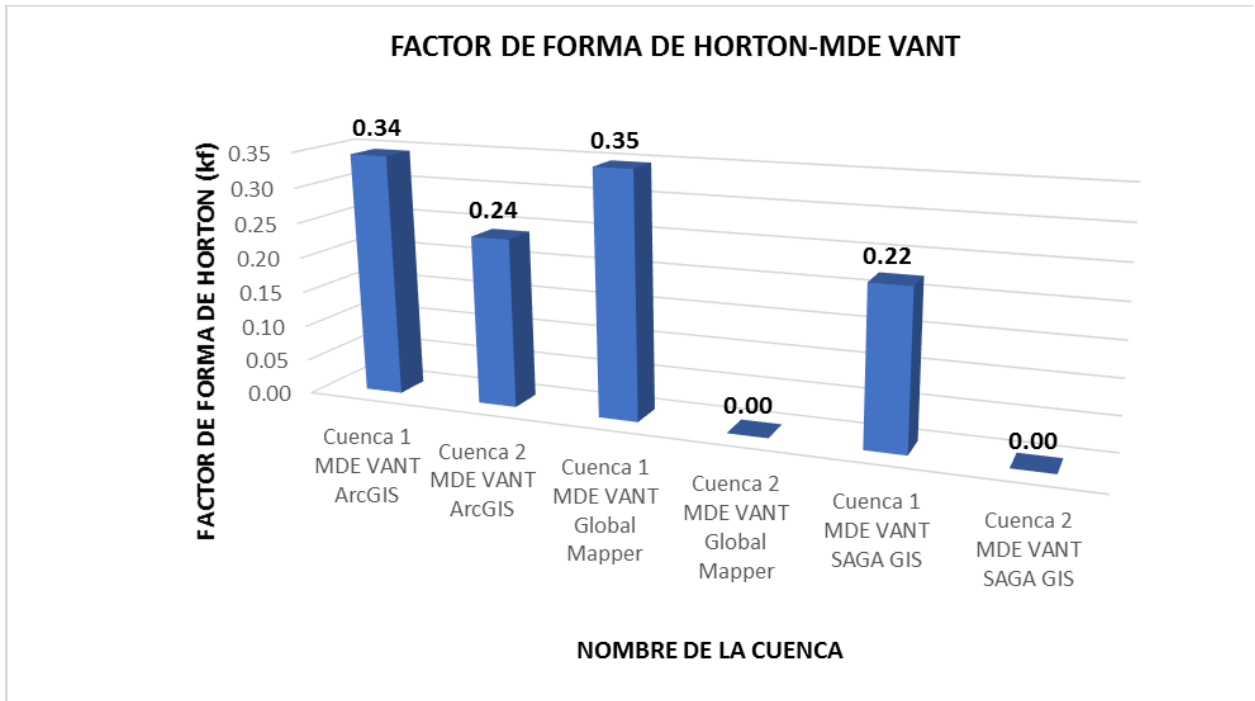


Figura 40. Resultados del factor de forma de Horton con el MDE VANT.

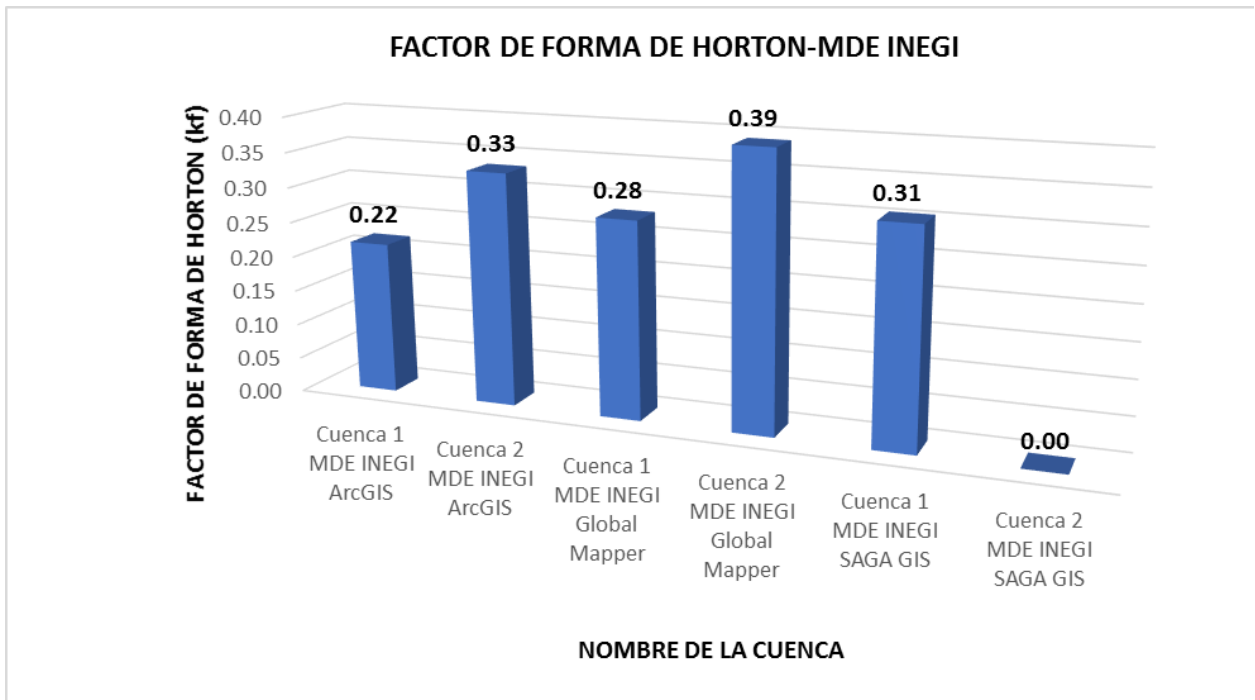


Figura 41. Resultados del factor de forma de Horton con el MDE INEGI.

Relación de elongación

En la relación de elongación se mostraron valores muy similares en todas la cuencas generadas, cuyo valor máximo fue de 0.71 que se presentó en la microcuenca 2 del MDE del INEGI y el programa GlobalMapper y valor mínimo fue de 0.53, valor presente en dos microcuencas, en la microcuenca 2 del MDE con VANT y el programa SAGA GIS y la microcuenca 1 del MDE del INEGI y el programa ArcGIS, sin embargo, el valor máximo y el valor mínimo se encuentran dentro de la categoría de una cuenca plana con porciones accidentales, ya que esta categoría se encuentra entre el rango de 0.5 y 0.8.

Tabla 18. Cálculo de relación de elongación.

Programa	Ecuación	Relación de elongación (Re)			
		VANT		INEGI	
		Cuenca 1	Cuenca 2	Cuenca 1	Cuenca 2
ArcGIS	$R_e = 1.128 \frac{\sqrt{A}}{L}$	0.66	0.55	0.53	0.65
Global Mapper		0.66		0.60	0.71
SAGA GIS		0.53		0.62	

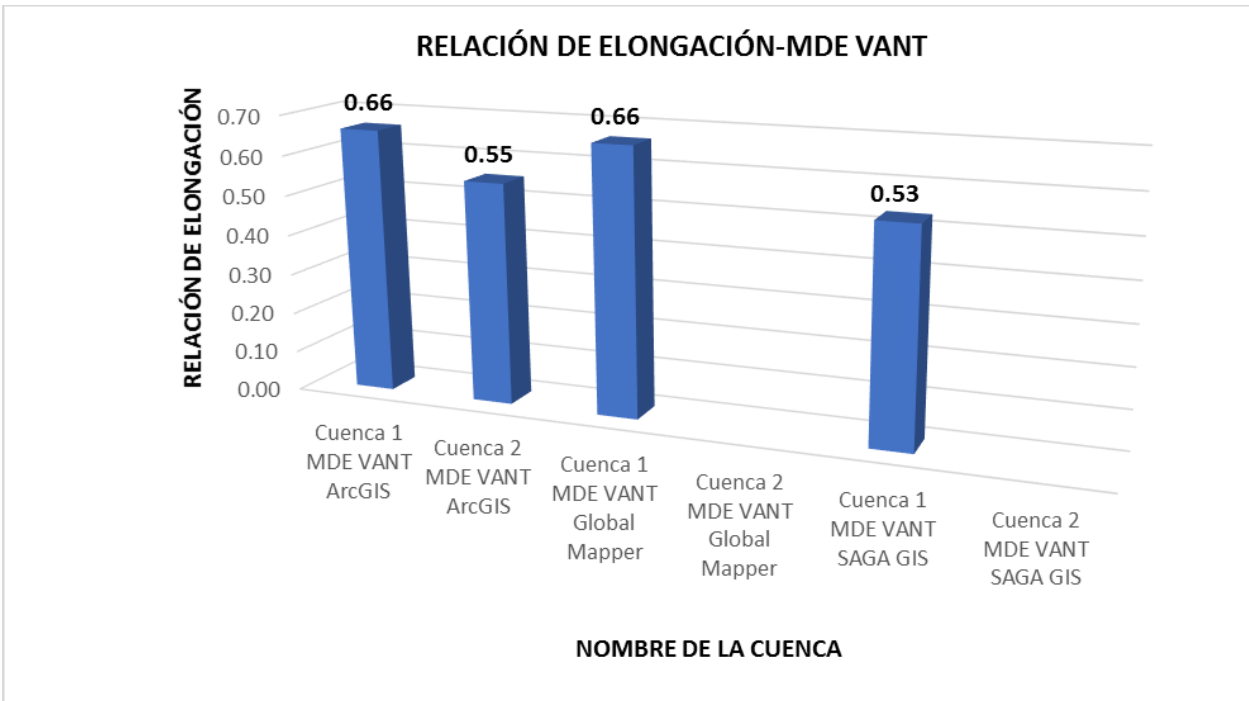


Figura 42. Resultados de la relación de elongación con el MDE VANT.

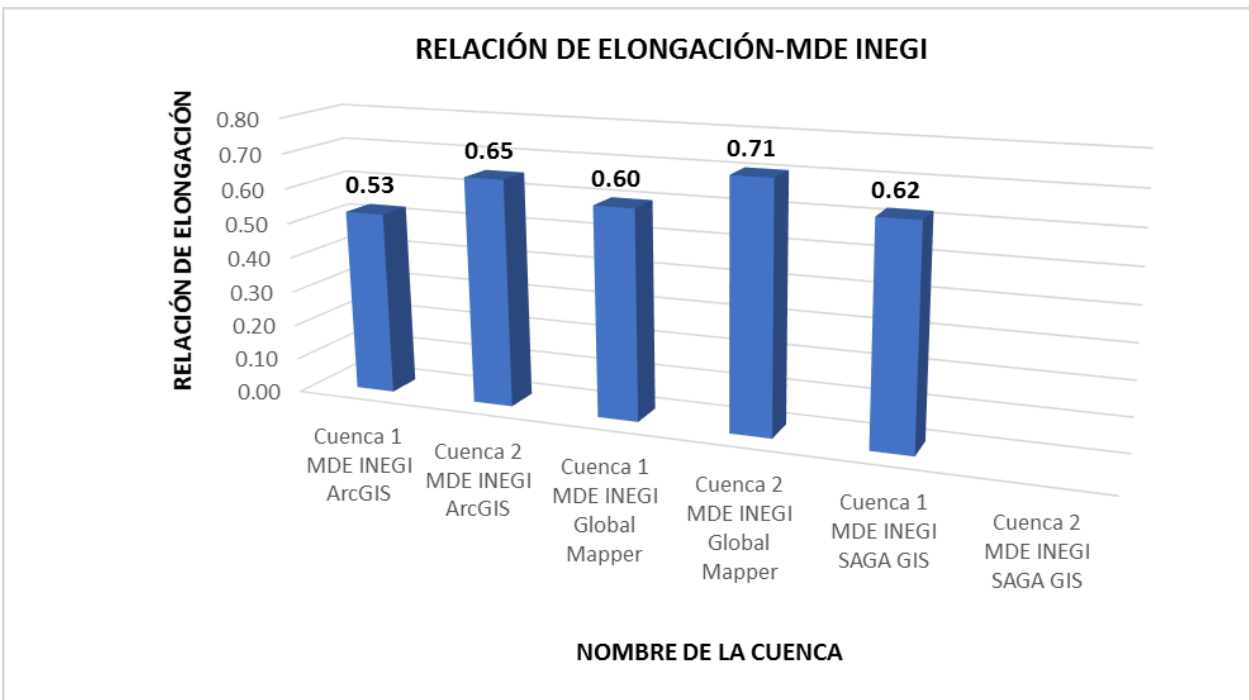


Figura 43. Resultados de la relación de elongación con el MDE INEGI.

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones teóricas

La implementación de nuevas tecnologías para la realización de MDE ha sido un gran avance para el conocimiento de la superficie terrestre, y en particular para esta investigación, el MDE es la fuente primordial para la delimitación de microcuencas intraurbanas. Tecnologías como los equipos GNSS/GPS, uso de VANT y programas especializados en restitución fotogramétrica permitirán realizar análisis morfométricos de microcuencas más precisos en comparación a los MDE disponibles de diversas fuentes gubernamentales y sectores privados.

La metodología para la generación de un MDE de alta resolución es fundamental a partir desde una correcta planificación de vuelo con VANT, considerando factores físicos del área de estudio, condiciones meteorológicas e incluso el momento del día que se realiza el vuelo, ya que estos factores se ven relacionados a la calidad de las fotografías obtenidas como insumo inicial para los MDE por métodos fotogramétricos.

Por otra parte, la precisión de los MDE varía dependiendo de la técnica con los que se generaron, con respecto a técnicas fotogramétricas, la precisión de estos modelos dependerán de una correcta distribución de PCTs en el área de estudio utilizando coordenadas de gran precisión, además de un adecuado proceso fotogramétrico en el cual se deben contemplar algunos parámetros del tipo de cámara que se utiliza, si bien los programas fotogramétricos cuentan con un catálogo de cámaras fotográficas y sus especificaciones, en ocasiones estos parámetros deben ser ingresados manualmente, ya que la utilización de estos son uno de los factores principales para realizar una correcta restitución.

Conclusiones metodológicas

La propuesta del uso de la metodología de la generación de MDE de alta resolución mediante procesos fotogramétricos se considera la más viable para la generación de microcuencas intraurbanas, siendo la zona del El Vidrio la primera zona de estudio en la cual se implementa esta metodología, cuyos resultados han sido de gran aportación para el conocimiento de la morfometría de las microcuencas, sin embargo, la información obtenida no solo se limita a lo

mencionado, si no también ser de gran relevancia en la realización de estudios hidrológicos y el conocimiento hidrodinámico.

El uso de programas SIG y sus herramientas hidrológicas facilitan el procesamiento de los MDE en la generación de microcuencas de la zona de estudio. Los programas SIG como ArcGIS, GlobalMapper y SAGA GIS son opciones viables para la realización de estos estudios, sin embargo, los resultados de estos programas son variables entre estos mismos, especialmente en la geometría de las microcuencas y sus escurrimientos superficiales.

Dicho esto, y en experiencia del comportamiento de los escurrimientos superficiales con respecto a antecedentes de eventos de precipitación de la zona, El programa ArcGIS junto con sus herramientas hidrológicas es el programa que mejor describe las microcuencas y escurrimientos en ambos MDE (VANT e INEGI).

Con respecto al comparativo de resultados de los programas SIG, sus variaciones se pueden atribuir a los algoritmos de las herramientas hidrológicas implementados en cada programa, a su vez, es recomendable la realización de más estudios que involucren el uso de estos tres programas para poder definir de mejor manera las ventajas y desventajas de cada uno de estos, sin dejar de lado la capacidades de los ordenadores en el cual se llevan a cabo estos procedimientos.

Conclusiones físicas

La mejor resolución del MDE generado de 0.13cm/pix en comparación del MDE del INEGI con una resolución horizontal de 5m/pix y 1m/pix de resolución vertical, permite definir de mejor manera los elementos existentes sobre la superficie terrestre y la topografía de la zona de estudio.

En cuanto al comportamiento de los escurrimientos de las microcuencas, los tres programas SIG mostraron un comportamiento relativamente similar en cuanto a la dirección de flujo, transcurriendo en dirección este-suroeste seguidas de la parte sur y oeste, esto debido a las características morfométricas de las microcuencas, añadiendo que estas microcuencas se encuentran dentro de la cuenca del Río Nuevo cuyo cauce transcurre aledañosamente a la zona de El Vidrio, concordando con las direcciones de flujo que tiende este río (sur-norte).

La metodología de trabajo de esta investigación no se ve limitada exclusivamente a esta zona de estudio, si no en cualquier parte en el cuál se desee obtener este tipo de información, sin ignorar las adecuaciones necesarias dependiendo de las particularidades del sitio. En cuestiones del conocimiento de la hidrología urbana, los resultados obtenidos pueden ser de gran relevancia en la toma de decisiones en cuanto a la gestión hídrica.

Referencias bibliográficas

Scott Watson, C., Kargel, J. S., & Tiruwa, B. (2019). Uav-derived himalayan topography: Hazard assessments and comparison with global dem products. *Drones*, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/drones3010018>

Shao, Z., Fu, H., Li, D., Altan, O., & Cheng, T. (2019). Remote sensing monitoring of multi-scale watersheds impermeability for urban hydrological evaluation. *Remote Sensing of Environment*, 232. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111338>

Zhang, H., Aldana-Jague, E., Clapuyt, F., Wilken, F., Vanacker, V., & van Oost, K. (2019). Evaluating the potential of post-processing kinematic (PPK) georeferencing for UAV-based structure-from-motion (SfM) photogrammetry and surface change detection. *Earth Surface Dynamics*, 7(3), 807–827. <https://doi.org/10.5194/esurf-7-807-2019>

Aguilar, G., Enrique, A., Cruz, P., Ricardo, N., Uvin, I., & Cruz, E. Z. (n.d.). APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA AÉREA EN LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS.

Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061717>

Sanz-Ablanedo, E., Chandler, J. H., Rodríguez-Pérez, J. R., & Ordóñez, C. (2018). Accuracy of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and SfM photogrammetry survey as a function of the number and location of ground control points used. *Remote Sensing*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/rs10101606>

Liu, Y., & Jin, S. (2019). Ionospheric Rayleigh wave disturbances following the 2018 Alaska earthquake from GPS observations. *Remote Sensing*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/rs11080982>

Langhammer, J., Bernsteinová, J., & Miř ijovský, J. (2017). Building a high-precision 2D hydrodynamic flood model using UAV photogrammetry and sensor network monitoring. *Water (Switzerland)*, 9(11). <https://doi.org/10.3390/w9110861>

Villanueva, J. R. E., Martínez, L. I., & Montiel, J. I. P. (2019). DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. *Sensors (Switzerland)*, 19(14). <https://doi.org/10.3390/s19143205>

Andersson, L., & Sivertun, A. (1991). A GIS-supported method for detecting the hydrological mosaic and the role of man as a hydrological factor. In *Landscape Ecology (Vol. 5, Issue 2)*. SPB Academic Publishing bv.

Hashemi-Beni, L., Jones, J., Thompson, G., Johnson, C., & Gebrehiwot, A. (2018). Challenges and opportunities for UAV-based digital elevation model generation for flood-risk management: A case of princeville, north carolina. *Sensors (Switzerland)*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/s18113843>

Fox, A. J., Survey, B. A., & Nuttall, A.-M. (1997). PHOTOGRAMMETRY AS A RESEARCH TOOL FOR GLACIOLOGY. In *Photogrammetric Record* (Vol. 15, Issue 89).

Wu, S., Li, J., & Huang, G. H. (2008). A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography*, 28(3), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.006>

Lalangui Jaramillo, Y. J., & Zárate Torres, B. A. (2020). Evaluación del modelo digital de terreno obtenido mediante técnicas de fotogrametría con VANT y con técnicas GNSS aplicados a proyectos viales en zonas de mediana vegetación. *Avances Investigación En Ingeniería*, 17(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.6636>

Ley García, J., & Calderón Aragón, G. (2008). De la vulnerabilidad a la producción del riesgo en las tres primeras décadas de la ciudad de Mexicali, 1903-1933. *Región y Sociedad*, 20(41). <https://doi.org/10.22198/rys.2008.41.a521>

Llena, M., Vericat, D., & Martínez-Casasnovas, J. A. (2018). Application of structure from motion (SfM) algorithms for the historical analysis of changes in fluvial geomorphology. *Cuaternario y Geomorfología*, 32(1–2), 53–73. <https://doi.org/10.17735/cyg.v32i1-2.60410>

Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73, 539–543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>

Jauregui, L. (n.d.). Introducción a la Fotogrametría CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN A LA FOTOGAMETRÍA.

Garbrecht, J., & Martz, L. W. (n.d.). Digital Elevation Model Issues in Water Resources Modeling. <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>

Ribera Masgrau, L. (2004). Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. In *Doc. Anàl. Geogr* (Vol. 43).

Mark, O., Weesakul, S., Apirumanekul, C., Aroonnet, S. B., & Djordjević, S. (2004). Potential and limitations of 1D modelling of urban flooding. In *Journal of Hydrology* (Vol. 299, Issues 3–4). [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(04\)00373-7](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(04)00373-7)

Scott Watson, C., Kargel, J. S., & Tiruwa, B. (2019). Uav-derived himalayan topography: Hazard assessments and comparison with global dem products. *Drones*, 3(1), 1–18. <https://doi.org/10.3390/drones3010018>

Langhammer, J., Bernsteinová, J., & Miř ijovský, J. (2017). Building a high-precision 2D hydrodynamic flood model using UAV photogrammetry and sensor network monitoring. *Water* (Switzerland), 9(11). <https://doi.org/10.3390/w9110861>

Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping. *Water* (Switzerland), 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061717>

Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061717>

Andersson, L., & Sivertun, A. (1991). A GIS-supported method for detecting the hydrological mosaic and the role of man as a hydrological factor. In *Landscape Ecology* (Vol. 5, Issue 2). SPB Academic Publishing bv.

Villanueva, J. R. E., Martínez, L. I., & Montiel, J. I. P. (2019). DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. *Sensors (Switzerland)*, 19(14). <https://doi.org/10.3390/s19143205>

Villanueva, J. R. E., Martínez, L. I., & Montiel, J. I. P. (2019). DEM generation from fixed-wing UAV imaging and LiDAR-derived ground control points for flood estimations. *Sensors (Switzerland)*, 19(14). <https://doi.org/10.3390/s19143205>

Liu, Y., & Jin, S. (2019). Ionospheric Rayleigh wave disturbances following the 2018 Alaska earthquake from GPS observations. *Remote Sensing*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/rs11080982>

Hashemi-Beni, L., Jones, J., Thompson, G., Johnson, C., & Gebrehiwot, A. (2018). Challenges and opportunities for UAV-based digital elevation model generation for flood-risk management: A case of princeville, north carolina. *Sensors (Switzerland)*, 18(11). <https://doi.org/10.3390/s18113843>

Annis, A., Nardi, F., Petroselli, A., Apollonio, C., Arcangeletti, E., Tauro, F., Belli, C., Bianconi, R., & Grimaldi, S. (2020). UAV-DEMs for small-scale flood hazard mapping. *Water (Switzerland)*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/w12061717>

Fox, A. J., Survey, B. A., & Nuttall, A.-M. (1997). PHOTOGRAMMETRY AS A RESEARCH TOOL FOR GLACIOLOGY. In *Photogrammetric Record* (Vol. 15, Issue 89).

Garbrecht, J., & Martz, L. W. (n.d.). Digital Elevation Model Issues In Water Resources Modeling. <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>

Garbrecht, J., & Martz, L. W. (n.d.). Digital Elevation Model Issues In Water Resources Modeling. <https://proceedings.esri.com/library/userconf/proc99/proceed/papers/pap866/p866.htm>

Wu, S., Li, J., & Huang, G. H. (2008). A study on DEM-derived primary topographic attributes for hydrologic applications: Sensitivity to elevation data resolution. *Applied Geography*, 28(3), 210–223. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2008.02.006>

Shahbazi, M., Sohn, G., Théau, J., & Menard, P. (2015). Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling. *Sensors (Switzerland)*, 15(11), 27493–27524. <https://doi.org/10.3390/s151127493>

Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., & Reynolds, J. M. (2012). “Structure-from-Motion” photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>

Ngula Niipele, J., & Chen, J. (2019). The usefulness of alos-palsar dem data for drainage extraction in semi-arid environments in The Ilishana sub-basin. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 21, 57–67. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2018.11.003>

Mancini, F., Dubbini, M., Gattelli, M., Stecchi, F., Fabbri, S., & Gabbianelli, G. (2013). Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: The structure from motion approach on coastal environments. *Remote Sensing*, 5(12), 6880–6898. <https://doi.org/10.3390/rs5126880>

Tonkin, T. N., & Midgley, N. G. (2016). Ground-control networks for image-based surface reconstruction: An investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry. *Remote Sensing*, 8(9). <https://doi.org/10.3390/rs8090786>

de Lima, R. S., Lang, M., Burnside, N. G., Peciña, M. V., Arumäe, T., Laarmann, D., Ward, R. D., Vain, A., & Sepp, K. (2021). An evaluation of the effects of uas flight parameters on digital aerial photogrammetry processing and dense-cloud production quality in a scots pine forest. *Remote Sensing*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/rs13061121>

Smith, M. W., Carrivick, J. L., & Quincey, D. J. (2016). Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*, 40(2), 247–275. <https://doi.org/10.1177/0309133315615805>

Pusineri Profesora Cátedra SIG, G., Dto Hidrología, I., Raúl Pedraza Profesor Cátedra Hidrología de Superficie, I., Dto Hidrología Director Dto Hidrología, I., Cristóbal Lozeco Profesor Cátedra Riego Drenaje, I., & Dto Hidrología, I. (n.d.). USO DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN Y DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA.

Ghimire, G. R., Thakali, R., Kalra, A., & Ahmad, S. (n.d.). Role of Low Impact Development in the Attenuation of Flood Flows in Urban Areas. <http://viewer.nationalmap.gov/basic/>

Tarboton, D. G., Bras, R. L., & RODRIGUEZ-ITURBET Ralph, I. M. (1991). ON THE EXTRACTION OF CHANNEL NETWORKS FROM DIGITAL ELEVATION DATA. In *HYDROLOGICAL PROCESSES* (Vol. 5).

Leitão, J. P., Moy De Vitry, M., Scheidegger, A., & Rieckermann, J. (2016). Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(4), 1637–1653. <https://doi.org/10.5194/hess-20-1637-2016>

Jayasooriya, V. M., & Ng, A. W. M. (2014). Tools for modeling of stormwater management and economics of green infrastructure practices: A review. In *Water, Air, and Soil Pollution* (Vol. 225, Issue 8). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2055-1>

Coloradas, L., Moa, C., Domínguez González, L., Rodríguez Infante, A., Wobbe, F., Stanek, K. P., & Gloaguen, R. (2007). Instituto Superior Minero Metalúrgico. Morfoalineamientos en la zona costera entre el poblado de Yamanigüey y la ciudad de Baracoa.

Arbe, J. (n.d.). Fotogrametría y Fotointerpretación SESIÓN I. INTRODUCCIÓN, DEFINICIÓN Y ANTECEDENTES DE LA FOTOGAMETRÍA.

Fathy, I., Abd-Elhamid, H., Zelenakova, M., & Kaposztasova, D. (2019). Effect of topographic data accuracy on watershed management. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 16(21). <https://doi.org/10.3390/ijerph16214245>

Gafurov, A. (2021). The methodological aspects of constructing a high-resolution DEM of large territories using low-cost UAVs on the example of the Sarycum Aeolian complex, Dagestan, Russia. *Drones*, 5(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/drones5010007>

Nardi, F., Biscarini, C., di Francesco, S., Manciola, P., & Ubertini, L. (2013). Comparing a large-scale dem-based floodplain delineation algorithm with standard flood maps: The Tiber river basin case study. *Irrigation and Drainage*, 62(S2), 11–19. <https://doi.org/10.1002/ird.1818>

Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., Flores-Velázquez, J., Marcial-Pablo, M. de J., & Robles-Rubio, B. D. (2017). Quantification of the error of digital terrain models derived from images acquired with UAV. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas*, 9(2), 85–100. <https://doi.org/10.5154/r.inagbi.2017.03.007>

Olson, K. G., & Rouse, L. M. (2018). A Beginner's Guide to Mesoscale Survey with Quadrotor-UAV Systems. *Advances in Archaeological Practice*, 6(4), 357–371. <https://doi.org/10.1017/aap.2018.26>

Rajchl, M., Stirrat, J., Goubran, M., Yu, J., Scholl, D., Peters, T. M., & White, J. A. (2015). Comparison of semi-automated scar quantification techniques using high-resolution, 3-dimensional late-gadolinium-enhancement magnetic resonance imaging. *International Journal of Cardiovascular Imaging*, 31(2), 349–357. <https://doi.org/10.1007/s10554-014-0553-2>

Li, L., Yang, J., & Wu, J. (2019). A method of watershed delineation for flat terrain using Sentinel-2A imagery and DEM: A case study of the Taihu basin. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 8(12). <https://doi.org/10.3390/ijgi8120528>